

国际信息工程先进技术译丛

McGraw Hill Education

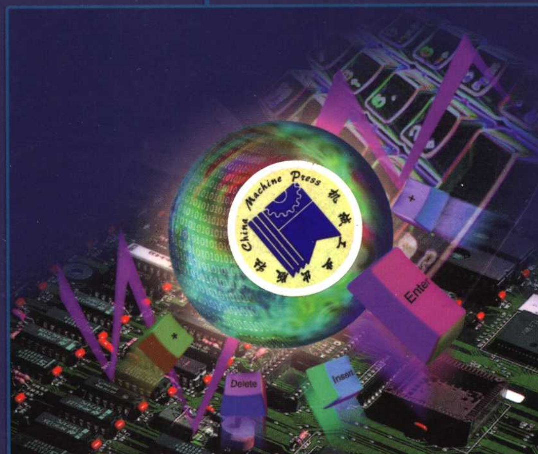
印制电路板——设计、制造、装配与测试

Printed Circuit Boards Design, Fabrication and Assembly

（美） R.S.Khandpur 著

曹学军 刘艳涛 钱宗峰 张光敏 等译

曹学军 刘艳涛 钱宗峰 校





机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际信息工程先进技术译丛

印制电路板——设计、制造、装配与测试

（美） R. S. Khandpur 著
曹学军 刘艳涛 钱宗峰 张光敏
李国霞 张志勇 李 悦 王 淼 译
王艳姝 袁 赛 杨海明 时显奇
曹学军 刘艳涛 钱宗峰 校

机 械 工 业 出 版 社

本书内容涉及电子学、机械工程学、流体动力学、热动力学、化学、物理学、冶金学和光学等学科和领域，基本上涵盖了印制电路板从设计、布局、制造、组装到测试的整个生产过程，反映了当前印制电路板的制造技术与先进工艺。此外，本书在印制电路板可靠性保障、产品质量控制以及环境问题等方面也有一定的参考价值。

本书由世界知名的电子学专家编写，可以使读者快速全面地掌握印制电路板的相关知识，既可作为科研院所、高等工科院校等相关专业的教材或教学参考书，也可作为印制电路板设计、制造、检测与维修人员等的技术指南或工具书，又可为电子工业领域中有意了解当今世界电子发展面临挑战的人员提供一个理想的自学参考书。

ISBN 0-07-146420-4

本书版权登记号：图字 01-2006-4836 号

图书在版编目（CIP）数据

印制电路板：设计、制造、装配与测试/（美）卡德普（Khandpuy, R. S.）著；曹学军等译. —北京：机械工业出版社，2008. 1
（国际信息工程先进技术译丛）
书名原文：Printed Circuit Boards: Design, Fabrication, And Assembly
ISBN 978-7-111-23048-9

Ⅰ. 印…　Ⅱ. ①卡…②曹…　Ⅲ. 印制电路　Ⅳ. TN41

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 194157 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：张俊红　责任编辑：顾　谦　责任校对：李秋荣
封面设计：马精明　责任印制：杨　曦
北京机工印刷厂印刷（兴文装订厂装订）
2008 年 2 月第 1 版第 1 次印刷
169mm×239mm · 21.375 印张 · 832 千字
0 001—4 000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-23048-9
定价：88.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
销售服务热线电话：（010）68326294
购书热线电话：（010）88379639　88379641　88379643
编辑热线电话：（010）88379768
封面无防伪标均为盗版

译者序

印制电路板几乎存在于任何电子领域，大到卫星、宇宙飞船，小到人们生活中所熟悉的各种电子产品，都可见其踪迹。可以说，印制电路板是现代电子工业领域的基石之一。

在印制电路板应用范围不断扩大的同时，各行各业对印制电路板的要求也越来越高。近年来，印制电路板的层数不断增加、线宽不断降低，印制电路板的设计制造技术得到了空前发展和广泛关注，对印制电路板行业人员的要求与需求也与日俱增。

目前，越来越多的工程技术人员都迫切需要有一本关于印制电路板设计制造方面，内容既全面详实、又能指导实践操作的教参书，但市场上已出版的大量有关印制电路板设计的图书往往因侧重于印制电路板设计软件的介绍而无法全面满足这一要求。鉴于此，机械工业出版社及时引进了本书，可谓慧眼识珠。

本书是印制电路板领域的一本经典著作，着重介绍了印制电路板设计的基本理论知识，印制电路板相关问题的分析与设计以及不同类型印制电路板的设计方法和技巧，建立了一个有关印制电路板设计、制造、组装、测试等的完整知识体系。本书具有以下几个特点：

基础性：本书既详细介绍了与印制电路板相关的基础知识，又规避了晦涩的数学理论和繁琐的公式推导，内容上图文并茂，语言上通俗易懂，使印制电路板领域的入门读者也不难理解其内容。

实用性：本书注重基础知识的介绍，更强调实际操作的阐述，特别是介绍了与印制电路板领域相关的许多边缘技术及应用设备，并在每一章后面都给出了与本章相关的常用标准，在全书的最后还为读者提供了印制电路板领域术语的中英文对照及详细解释，对印制电路板行业人员等极为实用。

先进性：本书由 R. S. Khandpur 主笔，在内容和体系上独具特色，无论从印制电路板的设计、制作以及测试等方面而言，还是从印制电路板的可靠性保障、产品质量控制以及环境问题等方面而言，都是一本市面上难得一见的好教材和值得借鉴的工具书，为解决当今微电子设计领域日益增加的密度问题提供了详尽而全面的指导与准则。特别是本书所论述的高密度互连、CAD/CAM、基板、蚀刻、焊接等技术以及环境问题等，为当今复杂印制电路板问题提供了最新的、创造性的解决方法。

本书由曹学军副教授负责审校、定稿，刘艳涛副教授负责全书的译校，钱

宗峰讲师参与了本书第 8 章、第 13 章及术语对照表的译校工作。

本书共有 15 章，按章节顺序，各章初译的执笔人为：前言、目录、第 8 章、第 13 章及术语表为钱宗峰译，第 1 章为李国霞译，第 2 章为张志勇译，第 3 章为王艳姝译，第 4 章为刘艳涛译，第 5 章为王淼译，第 6 章和第 15 章为张光敏译，第 7 章和第 14 章为李悦译，第 9 章和第 10 章为袁赛译，第 11 章和第 12 章为杨海明译。时显奇对本书的翻译给予了帮助指导。总参通信训练基地信息与通信工程教研室的师生也参与了部分翻译工作和资料收集整理工作。

此外，本书的翻译得到了总参通信训练基地有关业务部门和领导的大力支持与帮助指导，在此一并表示感谢。

需要说明的是，本书是译者在忠实于原书的基础上翻译的，书中观点并不代表译者本人及其所在单位的观点。

我们相信，本书的翻译出版会对我国印制电路板的设计、制造、测试等相关领域产生一定的促进作用。

由于印制电路板领域相关的理论、技术发展迅速，加之译者水平和时间有限，译文中的错误和不妥之处在所难免，敬请专家、读者给予批评指正。

译 者

2008 年 1 月

前　言

在电子产品的元件互连技术中，最常用的就是印制电路板（PCB）。在现代电子和机械元器件封装密度不断增加的情况下，印制电路板的需求越来越大。随着印制电路板层数的增多，印制线变得更精细，板子的层片变得更薄。特别是近10年来，集成电路技术的高度发展，又产生了将集成电路固定在印制电路板的新的设计需求。在20世纪70年代，双列直插器件用得很普遍，现在则大量采用表面贴装技术。另外，印制电路板上的间隔空间不断减小，穿孔之间导线的数量不断增加，孔的直径迅速变小，这导致了像盲孔或通孔之类微导通孔器件的大量应用。随着对成本-效益环节（费效比）强有力的调控，将来的印制电路板将具有更高的单位密度功能、更高的可靠性和更低的成本，厂家也将生产出对环境更加兼容的印制电路板。而且，全球制造业联合这一优势，将有效地保证印制电路板的设计和制造更符合全球统一标准。

目前市面上见到的此类图书并没有涉及到上述的所有方面。本书是印制电路板技术领域为数不多的参考书之一，它包括了印制电路板的设计、制造、组装和检测，还包括了可靠性和质量等方面的内容。因此，本书不仅涉及了印制电路板的设计，而且还提供了对印制电路板的物理结构及检测过程等更广泛的理解。尽管涉及电子学、机械工程、流体动力学、热动力学、化学、物理学、冶金学和光学等相关领域高度专业的学科，但本书尽可能做到用通俗易懂的语言讲述印制电路板相关的重要理论，而舍弃了冗长的理论推导。为了更全面地展现该领域的研究范围，本书最后还列出了大量的相关参考文献以供参考。

本书分为15章，每一章都涵盖了其相关领域的内容并独立成章，便于阅读理解，每一章的内容都按照所介绍技术实际发展的先后顺序来安排。本书适合在该领域具有一定实践经验、对印制电路板制造设备和材料有一定了解的人士阅读。

第1章是印制电路板领域的一个总的介绍，从印制电路板的发展谈到了它的分类以及制造、设计和组装。对现代印制板工业发展的主要驱动，特别是高密度互连技术也作了说明。第1章还简要介绍了电子电路封装协会，该机构制定了一系列的标准，在印制电路板工业领域扮演着重要的角色。

在许多设计公司，负责规划设计和版面生成的通常是制图员，他们在机械工程领域接受训练，需要理解电子元器件及集成电路（IC）和表面贴装器件（SMD）的基本原理，为了满足他们的需要，第2章将致力于介绍许多电子元器

件的基本概念及性能。

第3章将介绍印制电路板布线图的规划和总体设计，第4章详细介绍了像高频电路及高密度互连这类特殊电路，并特别涉及了模拟电路和高功率电路。

直到十几年前，布线图仍然用手工生成，如今可以采用计算机辅助设计系统，配合从小商贩那里就可以买到的封装软件，不仅简化了这一工作，而且还使高密度电路板的生成更加方便。计算机辅助设计使得布线图的生成与计算机辅助制造的结合成为可能，随着制造厂房的分散，人们认为设计数据转换这一机制非常重要。第5章介绍了手工布线图的生成以及基于计算机辅助设计和计算机辅助制造的布线图的生成。

第6章详细介绍了印制电路板的核心基础——板材的原料。本章不仅讨论了印制电路板结构方面的内容，而且还详细叙述了目前印制电路板的常见缺陷，并从质量保证的角度介绍了印制电路板的检测方法。

特别是由于精细印制电路板的苛刻需求，板层上布线图的图像转换技术有了极大的发展，激光直接图像转换技术变得越来越流行。第7章介绍了传统图像转换技术和现代图像转换技术。

印制电路板制造的下一步自然是蚀刻技术，第8章介绍了各种蚀刻技术，包括湿蚀刻和干蚀刻。第9章详细叙述了电镀技术。另外，第9章还涉及了为导线通路提供良好表面的各种方法，包括焊料掩模和显影保形涂层。

精细的机械操作是保证印制电路板制作质量的重要一步。据报道，印制电路板中发现的85%的缺陷都是直接或间接由于打孔引起的。另外，不断减小孔径的尺寸也使得传统的机械打孔方法满足不了需求。第10章讨论了目前为克服这一限制而广泛使用的激光技术。

多基板基于特殊的设计和制造技术，使得高密度板成为可能，第11章对此进行了讨论。第12章介绍了柔性板的特征，包括设计、制造技术以及应用。

第13章致力于焊接与组装技术，包括手工及基于机器的自动化系统，介绍了重新加工程序，特别是具有SMD和混合组装的电路板。

第14章讲解了印制电路板质量和可靠性方面的内容，并制定了可接受的标准，详细介绍了裸板和已装配板的测试，以及它们的局限和应用范围。

对于印制电路板工业污染问题及其治理方法则在最后一章作了叙述，最后还对印制电路板的回收和环境设计的概念作了简要介绍，本章还涉及了无铅焊接及其在目前的应用状态这一关键问题。

本书提供了一个详尽的常用术语表，大量的文献对于那些需要更详尽专业信息的人们都非常有用。互联网已成为各种各样信息的无价源泉，特别是关于印制电路板的制造及其相关技术。本书参考文献提供了互联网上的大量资料。

最后，我要感谢我的妻子Ramesh Khandpur女士，她是帮助我获得人生目标

的巨大的精神动力的源泉，是她全心全意的支持使我在我的职业生涯中永不懈怠，同时还要感谢急切想要看到这一新作出版的我的孩子和孙子们。

我还要感谢 Tata McGraw-Hill 公司的 New Delhi，是他允许我使用 W. C. Bosshart 先生《印制电路板》一书中的插图，使得本书高质量地出版。

R. S. Khandpur

目录

第1章　印制电路板基础

1.1　电子设备的连接

电子设备是将电气组件与电子组件连接起来以实现特定设计功能的一种结合体。在电子管时代甚至是在其之后，电子设备一直是通过手工布线及点到点焊接来制造的，导线被剥掉绝缘外皮后用焊锡焊接，每个分立组件均以电气或机械方式手工安装。这样生产出来的电子设备体积庞大笨重，无法满足飞机、医疗机械及家庭应急设备的需要，这使得研制更为小巧的电子设备成为必要。

这一领域的技术在多个方面都取得了进步。组件体积越来越小，模块式设计日渐流行，组件易于更换，缩短了维修时间。电子设备设计的微型化和次微型化推动了组件间连接与组装领域一项新技术的产生，即印制电路板技术。

印制电路板（Printed Circuit Board，PCB）不仅实现了组件间的物理结构的安装，同时还支持各组件的电气连接。

印制电路板通常缩写为 PCB，简称电路板。不过，在美国，PCB 更多地被称为印制线路板（Printed Wiring Board，PWB）。

1.1.1　印制电路板的优势

与其他组件互连及组装技术相比，印制电路板技术有很多优势，例如：

1）组件装配尺寸减小，重量也相应降低。

2）可以以更低的单位成本实现批量生产。

3）组件布线及组装可实现机械化。

4）不改变电路内部电容，保持电路性能。

5）可保证各组件之间高度可重复性与电气性能的一致性。

6）各部分位置固定，可简化电子设备及系统的识别与维修。

7）印制电路技术降低了错误的可能性，从而缩短了检查时间。

8）对印制电路操作人员的技术水平要求不高，所需培训量小，布线过程中出错及短路几率得以减小。

1.2　印制电路板的发展

印制电路板发展历史不长，虽然早在20世纪50年代初就有人提出了这一概念，但直到近50年后它才被投入商业应用。

1904年，当时还是学徒的斯普雷格电气（Sprague Electric）公司的创始人弗兰克·斯普雷格（Frank Sprague）萌生了消除点对点连接的想法。当他向导师托马斯·爱迪生（Thomas Edison）求教如何实现这一想法时，得到的建议是生产镜子或石墨印制过程中使用的银还原反应可能会行之有效。之后，人们在印制电路板技术方面做了大量的探索与研究，下面是该技术发展过程中的一些重要事件。

1925年3月2日，查尔斯·杜卡斯（Charles Ducas）先生向美国专利局递交了一份专利申请（Fjelstad，2001），建议将导电的金属按照导体的形状直接覆盖在绝缘材料上以简化电子设备的结构，这是印制电路板技术发展历史上第一个重大贡献。他用模板在绝缘材料表面做成导线的形状，然后沿设计线路涂上导电的膏剂。除去模板后，再在线路上镀上电解金属，直至所需厚度。这一过程大大简化了电器生产，因为电镀过程简单，对操作人员的技术要求不高。

17天后，弗朗西斯·T·哈尔曼（Francis T. Harmann）先生为其所谓的制造印制电路板的减色㊀方法申请了专利，这一方法称得上蚀刻技术的首创。1926年4月，法国人塞萨尔·帕索里尼（Cesar Pasolini）发明的电气连接中的加成法获得了专利。1928年9月，塞缪尔·查尔斯·莱德（Samuel Charles Ryder）向澳大利亚政府递交的专利申请则主要涉及用于收音机开关及其他类似电器的电感线圈的生产，他提出在生产过程中将导电漆直接印制或喷涂在底板上。同样，赫伯特·C·阿尔特（Herbert C. Arlt）先生于1935年7月在美国提出专利申请，再次强调了避免使用导线的基本发展目标。

对现代印制电路技术的发展做出主要贡献的是保罗·艾斯勒（Paul Eisler）博士㊁，他提出使用板状覆铜绝缘材料作为生产电路板的基材。他认为可以“将抗蚀剂按电路图形状印制于覆铜板表面，并以蚀刻方法去除暴露部分的金属”，他还提出在覆铜基板两面布线，并将两面的导线通过小孔连接。艾斯勒的研究提供了一种批量生产的方法，同时也降低了电路板的重量和体积，这一点对军用设备来说非常重要。因此，艾斯勒博士常被称为印制电路板技术之父。不过，

㊀ 减色（Subtractive）：属于或关于一种生成正像的摄影过程，通过混和或重叠能够选择性地吸收有色光的物质。——译者注

㊁ 有的资料上称Paul Eisner博士，参见姜雪松、陈绮、许灵军等编著的《印制电路板设计》一书。（机械工业出版社，2006年）。——译者注

他主张使用小孔，排斥镀通孔技术，但随着时间的推移，后者已成为了双面板及多基板生产最基本的过程。

第二次世界大战末期，美国国家标准局研究出的一种新技术，被应用于美军火箭近爆（无线电）引信（Proximity Fuses）中变时（Variable Time，VT）引信的批量生产。与艾斯勒的印制与蚀刻方法不同，该技术采用丝网印制方法将印制银膏导线及石墨电阻印制到陶瓷基板上。人们更多地把它与现代的混合电路技术联系在一起，正是这一技术推动了印制电路板的商业应用。

二战后，电子技术极大的发展带动了对收音机、电视机等消费品需求的迅速增长，以及电子产品在军事领域的应用。这些发展都需要可靠性高且日趋复杂的电路板，基于当时的生产技术，组件密度达到最大值后，双面板取代了单面板。在双面板中，导线间无需另外附加特殊的跨接线便可互相交叉，这一技术随着镀通孔的产生而得以最终实现。

1953～1955 年间，摩托罗拉（Motorola）公司在电路板两面互连中引入了镀铜技术，而这一技术更加适用于批量生产。20 世纪 60 年代，出现了使用催化活化剂（Catalyst Activator）的化学电镀技术。在此期间，1964 年，美国的 Photo Circuit 公司发展了全添加剂法。使用这一方法时，基板表面不覆铜箔，只选择需要实现互连之处镀铜即可。

20 世纪 60 年代末，电子消费品领域迅猛发展，使得电路板生产以及裸板/组装板测试的自动化成为了必要。此后不久，即到了 70 年代，印制电路板已牢牢占据了电子消费品、科研设备、医疗设备、航空航天、国防，以及后来的个人计算机业等几乎一切电子产品领域。一系列新技术也相继研发应用，如感光膜、干膜及湿膜阻剂、阻焊剂、标示字符印制及计算机数控（Computer Numerical Control，CNC）钻孔等。随着使用埋/盲镀通孔连接与湿式制程技术的多基板与刚/柔性板的生产，印制电路板的体积大大减小。

组装技术，尤其是表面安装技术的新发展带来了印制电路板材料与制程领域的革新。今天，多种因素仍然推动着印制电路板技术的不断发展。随着集成电路（Integrated Circuit，IC）封装的输入、输出引脚数的增加，集成电路组件的性能越来越高，这就导致了对高品质印制电路板需求的增加，推动了高密度互连结构（High Density Interconnect Structures，HDIS）的产生，目前，多家公司都已开始生产高密度互连产品了。高频电子系统由于运行速度高，需要电损耗（衰减）更低的印制电路板。此外，更高的工作电压要求印制电路板具有更高的阻抗，以防电压击穿、高压电痕化（tracking）与电晕放电。

在电子产品领域，印制电路板具有非常重要的战略地位。因此，该产业在全球范围内拥有蓬勃发展的市场，预计在 2010 年前可保持 7% 的年增长率。在未来十年间，印制电路技术仍将是电子产业的主导因素，并将通过更加严格的

成本控制来提高性能、密度与可靠性，同时降低成本。基于减色法的印制电路板技术可能会向加成法转变，柔性板的使用有望增加，印制电路板的生产也会向更为环保的无铅化方向发展。可以预见，各种印制电路板（无论是现有的还是将要研发的）都将继续成为电子产品的重要组成部分，并可能在电子工业的某些领域占据更加重要的地位。

1.3 印制电路板的组成

印制电路板的基本组成部分有：

1）基板：为一刚性或柔性绝缘薄板，用以支撑全部导线及组件；

2）导线：通常为按适当形状牢固附着在基材上的细带状高纯度铜质材料。

基板为铜材区及其上附着的所有组件提供机械支撑。成品电路的电性能依赖于基材的绝缘性能，因而对基材必须有所了解并正确运用。

导线为组件提供电气连接及焊接点。

能为组件提供机械支撑及所需一切电气连接的完整的电路板就是印制线路板或印制电路板。之所以称为“印制”，是因为电路板上导电区的生成通常采用印制技术，如图表与标题印制中广泛应用的网版印制及光镂技术等。

1.4 印制电路板的分类

印制电路板可据其不同属性进行分类，但类别界线模糊。传统上根据应用把印制电路板分为三类，一般称为消费板（消耗板）、专业板与高可靠性板。

消费板通常用于收音机、电视机等消费产品及廉价的测试与测量设备中。这种电路板使用价格较低的基材，在生产中允许有较大公差，以降低成本，对良好、持续的电气性能并不十分重视。

专业板使用较好的基材与可控制造技术，以达到更加严格的电气与环保要求。

高可靠性板通常用于战略性设施，通过使用高品质基材与严格控制生产过程来提供最佳的电气性能。

上述分类适用于二三十年前，如今消费板与专业板之间的区别已经消失。许多消费品，如光盘、便携式摄像机、照相机等，其复杂程度、可靠性以及技术要求都已经超过个人计算机等专业产品。表面贴装技术的出现与自动组装技术的发展要求即便是最廉价的产品也必须按照严格的机械公差范围生产。

目前通用的印制电路板分类方法更加简单，易于理解。该方法以整个电路板的板层或布线层数以及镀通孔的有无为基础，此种分类方法具有与电路板规

格直接相关的优点。各种电路板的结构特点将在下面详细叙述。

1.4.1　单面印制电路板

所谓“单面”是指导线分布在绝缘基板的一面上。有电路图的一面称为“焊锡面”，另一面称为“组件面”。这种电路板多用于简单电路系统中，或是需将生产成本控制在最低水平的情况下。它们在目前生产的专业与非专业等级的电路板中占有很大的比重。图 1-1 所示为单面印制电路板的结构组成。

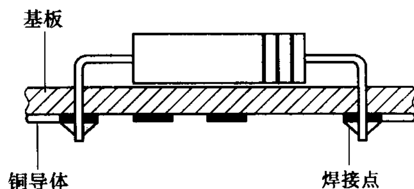


图 1-1　单面印制电路板

单面印制电路板的生产通常采用“印制与蚀刻”的方法，或者“冲切”技术，即使用带有电路图图形的光刻或机刻冲模。

一般来讲，组件要通过金属导线连接，如果无法连接，则需要使用跳线。由于电子技术方面的原因，单面板上只能允许少量跳线存在，从而导致了人们对双面板的需求。

1.4.2　双面印制电路板

双面印制电路板的绝缘基板两面，即组件面和焊锡面，都有电路图。显然，双面板的组件与导线密度都大于单面板。通常使用的双面板有两种，即

1）有镀通孔连接的双面板（PTH）；

2）无镀通孔连接的双面板（non-PTH）。

图 1-2 所示为两种双面板的详细结构图。

双面镀通孔电路板的绝缘基板两面都有电路图，并有通孔贯穿两面电路，通过为孔壁镀上金属可实现两面电路的连接。这一技术是多数印制电路产品的基础，尤其在复杂电路及高密度电路中，应用得更为广泛。图 1-3 所示是印制电路板镀通孔结构。

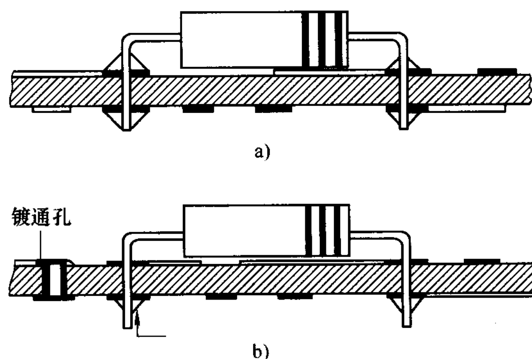


图 1-2　双面印制电路板
a）无镀通孔　b）有镀通孔

双面无镀通孔电路板只是单面板的扩展，因无需电镀而成本极低。必要时，此种电路

板上的导通连接通过将组件引脚焊接于基板两侧来实现。设计此种电路板时，应尽量控制组件面焊接点的数量，以便于必要时拆除组件。导线应尽量布在非组件面，组件面只留余下部分。

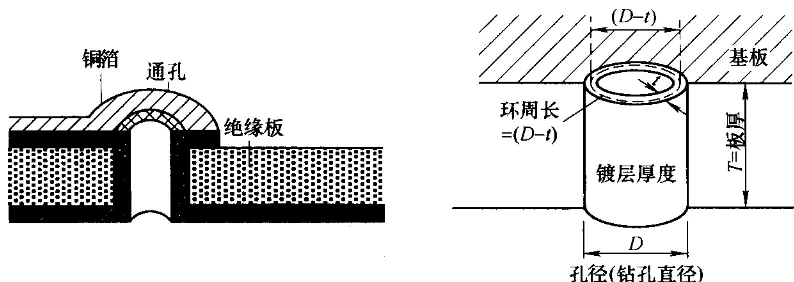


图 1-3　镀通孔结构

如图 1-4 所示，无电镀技术双面板中的互连是通过跳线实现的。一截加工好的实心绝缘引线穿过通孔，其两端分别焊接于基板两面的导线焊接点上。图 1-5 所示是用于双面板互连的其他类型铆眼（即空心铆钉）。

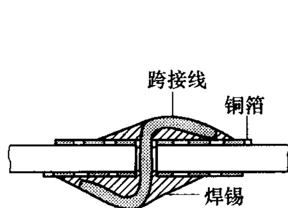


图 1-4　用弯曲跳线实现双面印制电路板的互连

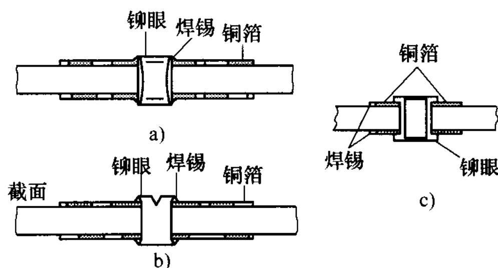


图 1-5　用铆眼实现双面印制电路板的互连
a）漏斗状折边的铆眼　b）撕裂状折边的铆眼
c）熔融状折边的铆眼

1.4.3　多层印制电路板

镀通孔技术的发展大大减少了不同板层间导线的跨越连接，从而减少了所需空间，提高了电子组件的封装密度。然而，现代超大规模集成电路与其他多针结构组件使得封装密度极大提高、互连线大量集中，从而导致了一系列复杂设计问题的出现，如噪声、电话串扰、寄生电容以及并联信号线路中不可接受的电压降落等。无论是单面板还是双面板都无法圆满解决这些问题，因而有必要在双面板的基础上发展多层电路板。当连接密度过高双面板无法满足，或为了线路阻抗的精确控制、接地屏蔽等原因时，就要用到多基板。

多基板使用两层以上的印制电路板，每层间都有一层薄薄的“半固化片”，从而呈现出如图 1-6 所示的三明治状。最上面一层电路板上的印制电路与传统印制电路板结构大致相同，只是组件间距更小了，为避免端子过多，需增加板层才能实现所需互连。通过在板子恰当的位置放置镀通孔与横向线路将不同板层的电路连接起来，整个电路便完成了。多基板有三个或三个以上电路层，多的能达到 50 层。图 1-7 所示为四层及八层多基板的结构。

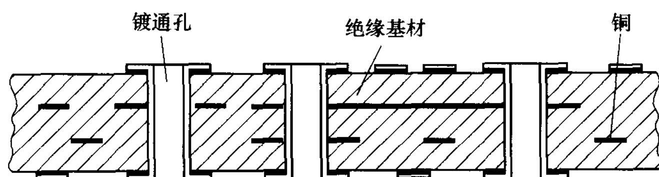


图 1-6　四层印制电路板横截面

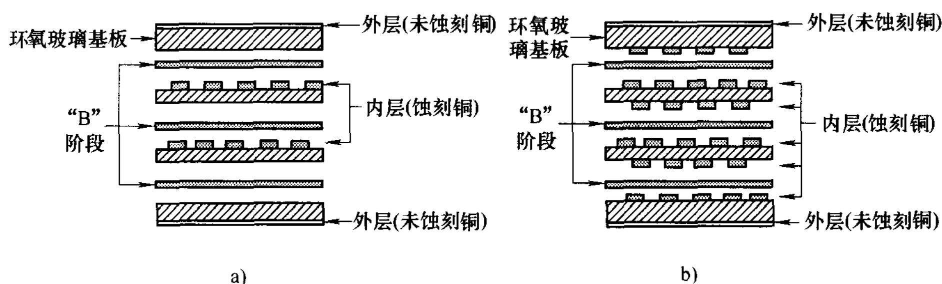


图 1-7　多层印制电路板的详细布局
a）四基板　b）八基板

依靠多层电路结构，多层印制电路使互连结构的重量与体积较之连接的组件的体积与重量有所降低。

多层印制电路主要应用于以下情况：

1）要求尽量减小重量与体积的互连结构中，如军用及机载导弹、航天设备等；

2）子系统中需复杂昂贵导线或电缆组合的复杂互连结构中；

3）需严格控制导线波阻抗保证其一致性，并将失真与信号传播控制在最低水平以满足频率要求时，或必须保证板与板之间上述性能一致时；

4）需耦合或屏蔽大量连接时，不同板层之间大容量的分布电容具有较好的电源去耦作用，使高速电路保持良好的工作状态；

5）有了多基板，所有互连可安置在内层，外表面可安装一个厚的固体铜散热装置。通过将组件直接组装到金属表面，系统中的热分布与热排出问题可降至最小。同时，信号层没有电源线和地线，使得布图与布线设计大简化。

由于大型压板技术的发展，使得四基板甚至六基板的制造同双面板一样简便。随着可靠性的提高与成本的降低，多层电路板的应用已由仅仅局限于高科技产品发展到了娱乐电子产品与玩具工业等普通领域。

印制电路板的成本与其复杂程度及所用技术有关。图 1-8 说明了印制电路板复杂程度与成本间的关系。

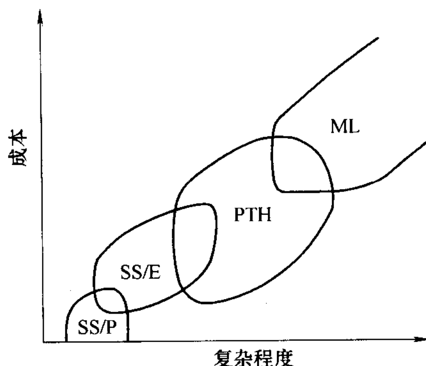


图 1-8 印制电路板的成本取决于其复杂程度和所采用的技术[㊀]

SSIP——单面纸质基板 SSIE——单面环氧玻璃基板 PTH——双面镀通孔环氧玻璃基板 ML——多层

注：经罗斯（Ross）与伦纳德（Leonida）同意重绘，1996b。

1.4.4 刚性印制电路板和柔性印制电路板

印制电路板还可以根据所用绝缘材料的类型，如刚性与柔性来分类。刚性板使用多种材料，柔性板使用聚酯或聚酰胺等柔性板材，基材很薄，厚度一般不超过 0.1mm。柔性板所用绝缘材料一面或两面附有卷状铜层。刚柔性合板［硬软性合板（rigid-flex board）］由刚性板与柔性板组合而成，是一种三层结构，即软板部分、硬板部分以及在硬板上面的组件。这种结构可节约封装空间，因而可广泛应用于电子设备领域。柔性印制电路板可为单面板、双面板（有镀通孔或无镀通孔）或多基板。

1.5 印制电路板的基本制造技术

目前存在多种印制电路板制造过程，但多数制造过程的基本步骤都是相同或相近的，其不同之处主要源于生产商为提高质量或达到特定产量而对基本生产步骤所做的变动。

㊀ 原书此图中“SS/P、SS/E”错误，应为“SSIP（单面纸质基板）、SSIE（单面环氧玻璃基板）”。——译者注

制造过程中最常用的“印制与蚀刻”方法属于纯粹的减色方法。在这一过程中，所用基材为覆铜板，所有电子组件都安装在覆铜板上，并由一层或数层蚀刻金属线连接。蚀刻过程要在基板一面或两面形成导电图形，而“印制线路”或“印制电路”一词仅指形成于基板表面的导电图形，以提供点到点的连接。

印制电路板生产过程中需要明白四个特定阶段，即设计、制造、组装与测试。以往，这四个阶段彼此相对独立（Biancini，1991）。然而，印制电路板的日趋复杂以及基于软件的设计与测试程序的发展，要求电路设计者不能只注重单个元素，而应整体分析，设计时应充分考虑可生产性、可组装性与可测试性。

1.5.1 单面板

图 1-9 简要地说明了单面印制电路板的设计与制造步骤。

1. 原理图

原理图，也叫电路图或逻辑图，以最易懂的方式展示电子组件与连接，是在综合考虑组件规格、组件间的相互作用（尤其是时序与加载）、物理封装以及输出引脚排列的基础上生成的。电路图一般首先绘制在纸上，最后由计算机辅助设计完成。电路图以符号（如 IC4）标明印制电路板的各部分，并以引脚序号注明各个连接。一个好的电路图包含了解电路工作所需的一切重要信息，以及包括印制电路板各部分在内的描述网与导线标识。为实现这一目的，印制电路板计算机辅助设计与原理图计算机辅助设计通过网表检查结合起来。简言之，成品电路图是设计的主要依据。

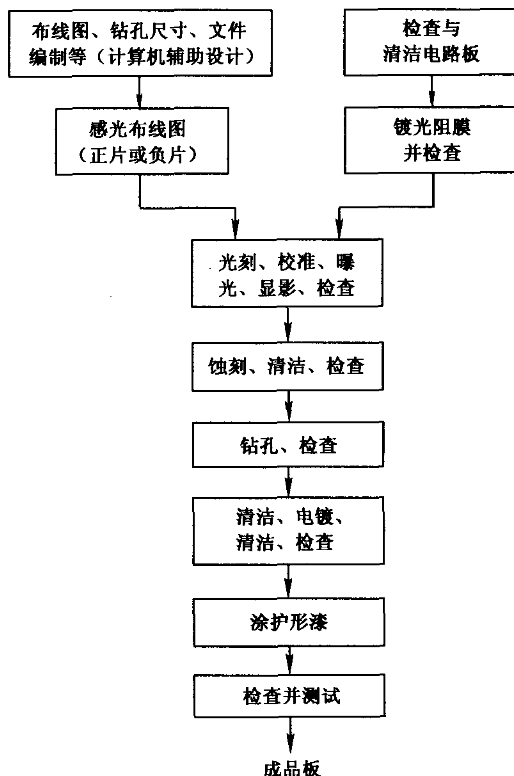


图 1-9　单面印制电路板的主要生产步骤

2. 布线图生成

印制电路板上的组件与连接是按照电路图完成的，设计者根据板的大小与

可实施性确定它们的位置及布局，以获得最佳效果。印制电路板布局决定电路的最终外观，标识方案也随着布局的完成而确定。印制电路板布局完成后，导线的布局方案通过一种黏着在聚酯等塑料薄片上的自粘性绉纱质材料给出。布局或布线图通常放大2~4倍，以提高精确度。通常，也可以使用计算机辅助设计软件在绘图机或磁带、软盘等电子转换介质上生成布线图。

之后，布线图将被缩小至最终尺寸，并根据生产需要制成正片或负片。

3. 板材准备

印制电路板的原材料是仅一面附有铜箔的覆铜板。层压板的各板层被剪切成所需大小，一般略大于印制电路板的主模。常用尺寸为350mm×508mm。一般用途的基板常用纸质板，需高级力学及电气性能时使用环氧玻璃板。其力学性能包括冲压及钻进质量、挠曲强度、耐燃性与吸水性等，重要的电气性能包括电介质强度、介电常数、损耗因数、绝缘电阻、表面电阻率、体积电阻率等。最常用的板材为FR-4环氧玻璃布板，厚为1.6mm，$1ft^2$ ㊀覆有1oz㊁铜箔（$305g/m^2$），铜箔厚度为35μm。

在基板上进行任何操作之前，都要先对其进行清洗去除杂质，这些杂质可能是有机物（油或油脂）、粒状物（灰尘或加工形成的微粒）、铜箔表面的氧化物或硫化物等。清洁过程可以使用清洗机完成。基板经过除脂溶液、刮擦、刷洗、酸洗以及一系列轻质去离子水清洗而完成清洁过程。

4. 图形转移

生产印制电路板的第二步是将原始布线图转印到基板的铜材表面上，布线图可以是感光负片，也可以是感光正片。感光底片由透明的聚酯衬底构成，厚为7mil㊂（174μm），其中包含4~8μm厚的卤化银感光乳液，能挡住波长在480~550nm以下的光线，因此，这种底片的显影只能在红光下进行。需印制的图像在底片上形成后，准备网布并在板上进行丝网印制。网印色剂覆盖印制电路板上最终所需的全部导电区域，在后续蚀刻过程中充当阻剂。在现代的印制电路板生产过程中，丝网印制仅限于对图像转印精度要求较低的情况。

另外一种更好的方法是使用可遮挡紫外线（200~500nm）的干性感光薄膜阻剂。用压膜机将感光阻膜（正片型或负片型均可）加热到110℃后压贴到板子的铜面上。使用正片型阻膜时，感光阻剂可在显影液中溶解，需要正片形式的线路图。负片型阻膜遇紫外线溶解而不溶于显影液，其布线图为负片形式。镀模板暴露在紫外线中，利用阻剂显影，被阻剂遮盖的板上应保留的铜面部分留

㊀ $1ft^2=0.0929030m^2$。——编辑注

㊁ 1oz=28.3495g。——编辑注

㊂ $1mil=25.4\times10^{-6}m$。——编辑注

了下来。

5. 蚀刻

蚀刻是印制电路板制作过程的核心，该过程以减色方法为基础，将不需要的铜箔部分除去，从而得到所需电路图。人们研究出一些化学方法用于蚀刻技术，最早用作蚀刻剂并仍在使用的是氯化铁，它将没有阻剂遮盖的铜箔氧化成氯化亚铜，但氯化铁不会再生，同时也具有腐蚀性。用作蚀刻剂的其他化学药品，如过硫酸铵、铬酸、氯化铜及碱性氨等，也各有利弊。

蚀刻通常使用浸蚀、起泡、溅蚀和喷蚀等方法。其中喷蚀最常用，它是通过加压将蚀刻剂吸到喷嘴，再喷到板面上。

6. 板身钻孔

在小规模生产中，电路板钻孔由单头手动钻机完成，通过使用模具来保证钻孔尺寸的正确且没有遗漏。人们还将多基板材叠在一起同时钻孔，批量生产时通常使用数控多头钻机。孔及焊接点中心都要经过蚀刻，以确保钻头能够进入。

电子组件的小型化要求孔径也要更小。同时，不同板材要用不同的钻头，对玻璃纤维板最好使用顶端镶有碳化钨或钻石的钻头。

7. 镀膜

印制电路板生产中使用铜质导线，因为铜具有良好的导热性与导电性。但铜遇到空气和水会迅速氧化，印制电路板的铜面如不加镀膜或其他保护物，则暴露区域会很快失去焊接性，所以对印制电路板上所有要焊接电子组件的焊垫，都需要某种形式的表面加工。

目前的印制电路板生产中，电路走线部分也需要由一种称为阻焊剂的材料加以保护。当电气组件需要与电路实现电气连接时才除去阻焊剂，没有阻焊剂之处必须进行其他方式的表面加工来加以保护。表面加工的目的一般是在电路板制造完成到组装期间用于保护焊垫与暴露走线，从而确保电路板在后续组装过程中的成功焊接。下面将详细叙述几种最常用的表面加工方法：

1）热风整平：对暴露铜材进行镀锡/铅，使锡/铅焊剂与暴露的铜形成一种金属间化合键，保护铜材不被氧化。

2）完全浸泡金属电镀：这一方法的基础是在电路板表面镀上非电解镍/沉金、银或锡，以防止电路因环境暴露而发生腐蚀。各种镀膜虽然焊接性不同，但都能提供实现可靠的密距焊接所必不可少的平整焊面。

3）有机保焊剂镀膜：即将电路板浸入一种含氮有机化合物溶液中，在裸露金属区形成不被基板或阻焊剂吸收的保护膜。此种保护膜的缺点是在电路板组装过程的加热环节中会使镀膜破损，因而一般不用于双面板。

4）护形膜：对于可能暴露在恶劣环境中的印制电路板组件，护形膜可提高

其性能与可靠性。护形膜是一种封护涂装在电路板上的塑料膜，可隔绝外界的灰尘与污染。丙烯酸树脂、聚氨酯、环氧树脂与硅树脂等都可用作护形膜。护形膜的喷涂一般由手工或机控设备完成。

8. 测试

印制电路板测试有两种类型：裸板测试与装配板测试。前者检测短路、开路与网表连通性，后者主要包括生产缺陷与电测分析、功能与组合测试（Biancini，1991）。随着走线密度与通孔数量的增加，电路板组装前的测试已成为必要。研究表明，高密度印制电路的故障率高达20%。如果不在组装前进行测试，高密板与多基板后续生产阶段的故障会使成本大幅提高。在电路板上组装专用集成电路或微处理器等贵重组件之前测试裸板是否达到设计预期质量要求会有效节约成本。因此，电路板生产中的裸板测试具有强制性。

应该注意到的是，在生产过程中的每一个环节，清洁都是必不可少的，同时检测也很重要。但为简便起见，设计与作图环节不必如此。

1.5.2　双面镀通孔板

处理单面板的技术也适用于多数其他类型电路板的处理。但双面电路板镀通孔的生产过程远比印制及蚀刻复杂，虽然可能有一些差别，其主要生产过程（见图1-10）大致相同。下面仅就与1.5.1节涉及到的步骤中的不同之处作详细描述。

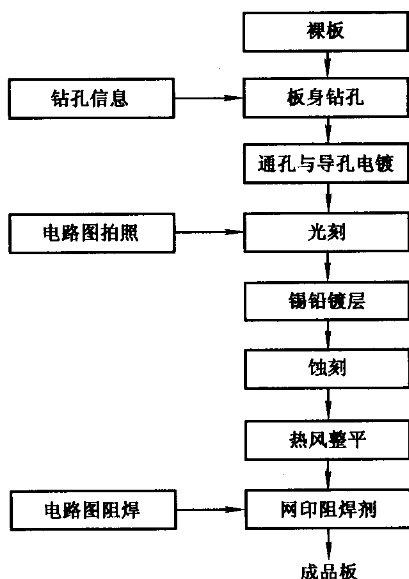


图1-10　双面镀通孔印制电路板的主要生产步骤

1. 板材准备

将两面覆有铜箔的板子剪切成所需尺寸规格，虽然板的尺寸取决于电镀设备的大小，但许多生产商都选择305mm×406mm的规格。基板覆铜为1oz/ft^{2}的环氧玻璃或FR-3。

2. 板身钻孔

对双面板，首先进行钻孔，然后去除手工或机械操作留下的毛刺，再彻底清洁，除去玻璃纤维或树脂碎屑。通常使用高压水枪进行清洁，水压为20～60atm[⊖]。

⊖　1atm = 101.325kPa。

3. 无电镀铜

先将电路板浸入氯化亚锡溶液敏化，板面尤其是孔壁的暴露树脂吸收锡离子。然后将板子浸入酸化的氯化钯溶液，钯离子被还原成胶态，促成无电镀铜沉积。无电镀铜沉积在含有硫酸铜、氢氧化钠、甲醛、还原剂及其他特殊添加剂的溶液中进行。在这种溶液中，铜离子被还原成金属铜，形成沉积，沉积铜厚度取决于浸泡时间。通常在基铜和孔壁上形成约 40μm 的铜层。

4. 图像转移（光刻）

电路板两面均附有一薄层固态或液态、正性或负性的光阻，固态负片最为常用。图像转移过程首先是除去保留线路部分的阻剂，这实际上是印制与蚀刻的反过程。留在成品板及孔壁上的铜箔上没有任何附着物，其他区域覆有硬化光阻。板两面的显影都由自动喷机完成。

5. 锡-铅镀层

将电路板浸入电镀槽中，对暴露线路区进行锡-铅合金电镀。全部导电区，包括印制电路板板面和导通孔中所有导体的镀层厚度约为 20 ~ 25μm，最薄不能低于 10μm。该金属镀层用作蚀刻过程中的阻剂。

6. 蚀刻

除所用蚀刻剂不能腐蚀锡-铅合金外，双面镀通孔板的蚀刻与上节所述蚀刻过程大致相同。蚀刻结束后，板面区域可有选择地（如接头处）镀上金、镍等贵金属，之后进行表面加工，如热风整平、阻焊处理及有机防护处理等。

最后按照用户要求对电路板进行检查与测试。成品板可能需要修理或再加工，用户可按照与生产商在最初协议中规定的条件验收产品。

1.5.3 多基板

多基板制造中应用最广泛的是层压方法，即将多层经过印图、预蚀的未钻孔覆铜板压合在一起。压合后的制作过程与双面镀通孔板的大体相同。

最基本的是将内基板与外基板用半固化片层叠起来。半固化片是一种吸满半固化树脂的玻璃纤维布，其制作类似于单面板。各板层与未经蚀刻的顶层及底层叠压成三明治状，最多可达 50 层。每基板都要在冲压工具中调整，避免错位。各独立板层经压合形成多基板，其后续加工与双面镀通孔电路板相同。外基板可为铜箔与半固化片或单面、双面覆铜板，内基板可为经蚀刻与镀通处理的双面覆铜板。压合过程在水压机或高压器中进行。

1.5.4 柔性板

柔性板的制作与单面板的相似，所不同的是柔性板一般采用冲压而不是钻孔。

印制电路板生产中除印制与蚀刻外，还可用一种叫做“加成法”的技术。使用加成法时，基板表面不需覆铜箔，而是根据电路设计，在基板选定区域沉积铜。

1.6　现代印制电路板设计和制造的挑战

电子产品市场正在飞速发展，据最保守的估计，目前美国电子产品年出口额已近万亿（Maxfield 和 Wiens，2000），并逐年呈上升趋势。这表明电子技术正在进入一个又一个新的领域，电子产品正在不断更新。

从系统角度来看，一种电子产品的推出要经过构想、记录、设计、生产等阶段，见图 1-11。

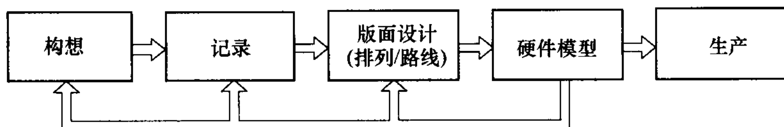


图 1-11　电子产品研发的主要阶段

“构想”阶段确定要求与规格，之后确定设计的整体结构。

“记录”阶段描述产品功能，说明设计意图。

“设计”阶段确定电路板上组件与线路的合理布局，包括将多个电路板连为一体的电缆与导线的分布。

以上几个阶段促成了硬件模型的制作，最后生产产品并将其投放市场。

不久前，电子产品的设计与制造还全部靠手工完成，设计和布线都还没有计算机或计算机辅助工具协助。电路图主要靠笔、纸和模板绘制，安装也只能参照图样与组件的纸板模型进行。电路板上的铜线以不同颜色的铅笔标识，代表板子的正面与背面。同样，也没有计算机辅助工具来检测电路功能与设计目的是否一致，只有在产品制成后才能进行测试，才能确定其能否正常工作。这就意味着必须制作硬件模型，并用所需测试设备进行手工检验。

不难想象当时设计者们的工作有多么困难。模型测试中发现的小错误就可能导致线路布局的变动，要用刀刻出线轨并/或手工加线才能改正。更为严重的错误则需要更改原理图，因而需要改变或增加组件，这就需要制作新的模型，其结果是延长开发周期。

此种设计方式耗时长、成本高，而且易出错。随着电子设备及其设计日趋复杂，人们开发出了自动化技术进行辅助设计。20 世纪 60 年代末和 70 年代初，最早的设计评价与设计校验工具以模拟电路与数字逻辑模拟装置的形式出现，

同期问世的还有用于电路板数字设计与线路布局的计算机辅助设计（CAD）工具。70 年代末出现了计算机辅助工程（CAE）软件，以协助完成设计输入。80 年代，所有这些工具集中起来，形成了完整的电子设计自动化（EDA）。

如今，人们需要的是更加小巧、快捷、轻便，以及功率更低、功能更多的电子产品。电子产品的性能需要进一步完善，而这需要强大的运算能力。随着时钟频率与信号速度的大大提高，所使用的无线设备也正大量增加。所有这些因素都刺激了各种复杂的计算机辅助设计工具、计算机辅助生产技术、计算机辅助工程软件以及便于加工的设计可制造性设计（DFM）工具与系统的发展。

到 20 世纪 90 年代中期，单功能电路板的设计制造已相当普遍，如 CPU 板与电源板等。此种电路板在所有系统中的功能相同，所以比较易于设计与制造。在通孔组件时期，引脚间距与通孔都较大，电路板设计比较直接。随着表面贴装技术的出现，引脚间距开始减小，表面贴装技术的最大优点是引脚小，引脚数多，每个设备可多达 84 个引脚。表面贴装组件的引脚间距已由最初的 25mil 逐渐减小到约 11mil，导线宽度与间距也相应减小，从而大大增加了印制电路板设计过程的难度。随着集成电路技术的不断发展，将数个较大的子系统安装在一小块有数百个引脚的芯片上已成为可能。多个子系统组装起来，就可以在一块小板上生成极为复杂的电路系统。

目前，一块电路板上可以有 3GHz 射频（RF）电路、模拟电路、数字电路以及电源电路等。将这些部分组合起来就可制成微型集成电路，如 μBGA，其引脚数非常多，目前已高达 1000 个，并正在向 2000、4000 个甚至更多水平发展。因此小型球栅阵列封装（BGA）与芯片级封装的应用越来越广泛也就不足为奇了。密距固着技术也包括封装，如倒装法或倒装晶体（有数千个 I/O 口）、多芯片组件（MCM）和芯片直接芯片贴装（DCA）等。由于引脚数通常都在 500 个以上，所以芯片生产商们越来越多也越来越迅速地采用球栅阵列封装。球栅阵列封装体底面具有密集阵列的锡球，其 I/O 性能远远优于传统的四方扁平封装。由于其体积更小、电气性能更佳、电能消耗更低，球栅阵列封装对电路板设计者与生产者也很有诱惑力。据 1998 年的报道，42% 的电路板设计人员使用球栅阵列封装，且该数量呈上升趋势。迄今为止，后续几代球栅阵列封装技术的发展都非常快。早期的球栅阵列封装，球脚间距为 1.27mm，如今的密距固着球栅阵列封装的球脚间距已达到 0.5～0.8mm 的水平（Wiens，2000）。图 1-12 为高密度密距封装技术发展示意图。高密度封装技术的应用带来了超密集、超复杂系统的出现，应用微孔与增层技术，要求将这些电路集中在一块 20 层的电路板上，这些要求给印制电路板设计者与生产者提出了极大的挑战。Peace（1991 年）曾对印制电路板领域的新兴技术作过简要的介绍。

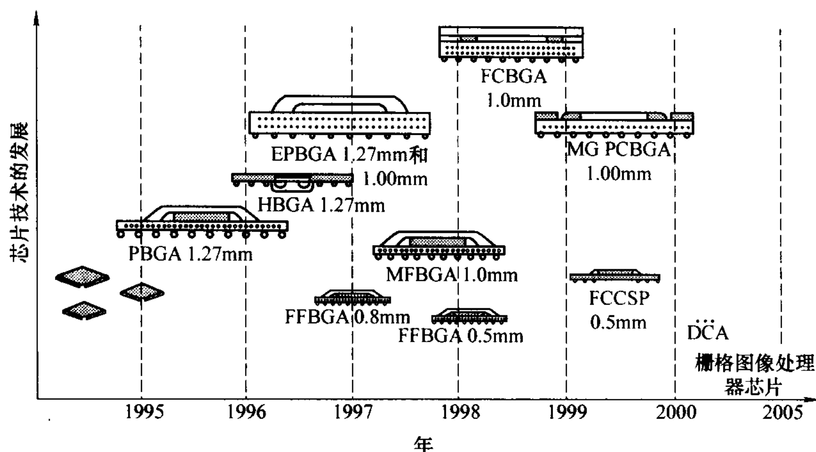


图 1-12 高密度密距封装技术发展示意图（经 Wiens 同意重绘，2000）

注：图中 PBGA 为塑封 BGA；DCA 为直接晶粒安装；HBGA 为高功率 BGA；FFBGA 为倒装芯片、精密脚距 BGA；EPBGA 为增强塑封 BGA；MFBGA 为金属封装倒装焊 BGA；FCBGA 为倒装焊 BGA；FCCSP 为倒装焊芯片级封装；MG PCBGA 为 MG PCBGA。栅格图像处理器（Rip）指 Intel 公司在其 G 系列芯片组中因执行高清视频（Clear Video）解决方案而加入的图像处理器。CSP 是内存芯片的最新封装技术，可以使芯片与封装的面积之比超过 1:1.14，32mm^2 的绝对尺寸约为普通 BGA 的 1/3。——译者注

1.7 印制电路板工业的市场驱动力

过去的 10 年中，科学技术以前所未有的速度发展更新，并迅速投入应用，这就意味着产品设计周期缩短、成本降低。图 1-13 所示为推动现代印制电路板设计进程的主要市场驱动力。可见，研发日程缩短，产品体积逐渐减小，如移动电话、便携式计算机及数码相机等。体积小型化的同时，对产品功能多样化与性能优越化的要求也同样迫切，因此产品最终体积更小、速度更快、功能更强、可靠性更高。

图 1-14 所示为个人计算机（PC）与移动电话工作频率的发展状况（Okubo 和 Otsuki，2003）。个人计算机的工作频率已经超过了 2GHz，而日立 SH 移动电话的工作频率为 133MHz，就速度而言，可与最早的奔腾芯片相比。1999 年以来，电子邮件与因特网的应用日益广泛，位宽由 16 位增加到了 32 位，市场要求蜂窝式便携无线电话的体积越来越小，移动电话微处理器的工作频率迅速增加。图 1-15 所示就是复杂印制电路板在移动电话和数码相机中的典型应用。毫无疑问，印制电路板的设计越来越具挑战性，同样设计者必须使用软件工具，以确保设计过程的高效率、低成本，并设计出更好的产品。

传统的电子互连技术显然已无法满足新一代更加小巧、更加密集的电路板的需要。全导通孔由于太大、太难使用而不适用于球栅阵列封装以及其他小型高输入/输出组件，增加板层也不可取。设计者正在研究减少板层以降低成本、缩短生产时间的方法。而增加线路密度、减小板层的方法看来就是更加先进、几何结构更好的互连技术，这一技术带来的更高的复杂性恰恰是印制电路板设计者所面临的挑战。

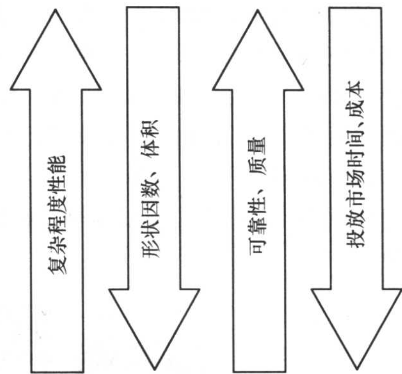


图 1-13　印制电路板工业的市场驱动因素表明，复杂程度与性能增加的同时，体积与形状因数越来越小。同样，市场需要稳定性更高、质量更好的产品，同时也要求降低成本，缩短投放市场的时间

当前的技术需求使微孔技术的地位牢牢地树立了起来，微孔指的是直径小于或等于 6mil（150μm）的孔。该技术已成为含有 BGA 与 CSP（芯片级封装）组件线路设计所选择的方法，孔径最小可达 2mil（50μm）或 5mil（125μm）。微孔技术的迅速发展也促使可透过印制电路板绝缘层实现互连的盲孔与埋孔技术得到广泛应用。微孔多用于盲孔结构中，通过盲

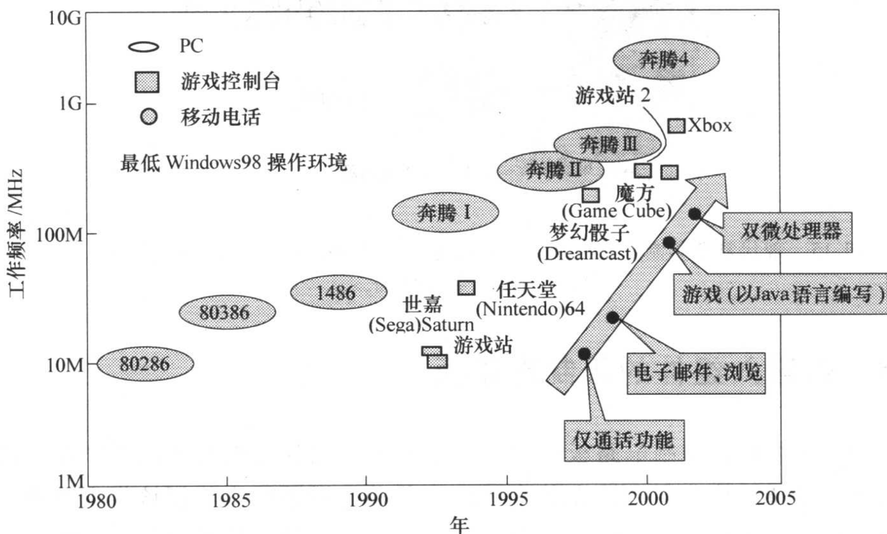


图 1-14　印制电路板与移动电话工作频率的发展
（经 Okubo 与 Otsuki 同意重绘，2003）[⊖]

⊖ Xbox、Game Cube、Dreamcast、Nintendo 64、Sega Saturn 均为游戏机名称。——译者注

孔，多层印制电路板的外基板可与相邻信号层连接起来，该技术在各种电子产品中的应用有效地提高了高密度组装体生产的成本效益。电子电路互连与封装协会（IPC）用高密度互连结构（HDIS）这一术语泛指所有微孔技术。采用微孔技术意味着产品设计可以最新、最小、最快，可以满足严格的射频/电磁干扰要求，实现成本不断下降的目标。所有这些要求对系统设计者来说都是挑战，他们必须找到更好的办法克服困难，完善产品性能（Holden 和 Charbonneau，2000）。

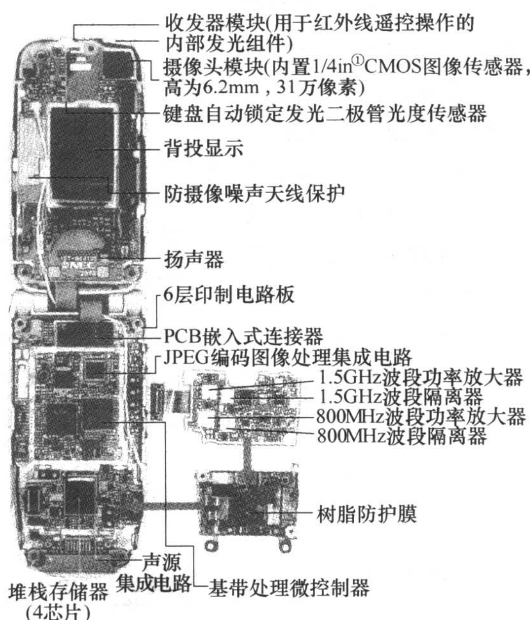


图1-15　现代复杂印制电路板示例：移动电话（经 Okubo 与 Otsuki 同意重绘，2003）

① 1in = 0.0254m。

1.8　带嵌入组件的印制电路板

带嵌入组件的印制电路板的应用越来越多，尤其是消费类电子产品。这一趋势始于摩托罗拉公司宣称在其全球数字移动电话系统中使用该类电路板。已被考虑嵌入的组件有无源元件与集成电路两种，前者的发展领先于后者。目前将大焊垫的集成电路嵌入小型电路板中已能够实现，但还欠缺相应的测试与校验方法的支持。无源元件的嵌入方法一般有三种：

1）嵌入现有无源元件：此种方法对嵌入组件的类型没有特殊要求，设备生产商可以选取所需阻抗或电容，但要使用较厚板材以承载所选组件。另外，与

表面贴装技术相比，嵌入技术所需的处理更多，如在板上钻孔容纳组件等，因而很难大幅地降低成本。

2）嵌入特制薄型无源元件：因为组件厚度可减至 100μm 甚至更薄，所以此种嵌入方法允许使用较薄的板材。电路板各板层叠压在一起时，液态树脂将元件包裹实现嵌入，因而无需钻孔。

3）通过印制技术制造薄膜装置：因为薄膜装置可瞬间完成，所以应用此种方法可使封装步骤大大减少，成本大幅降低。锡球数量减少可提高结合点的可靠性，减轻产品重量，降低环境负荷。

嵌入组件很可能催生可佩带产品，类似于项链或手镯形状。图 1-16 所示为 2006～2012 年数码相机与移动电话平均重量与体积的趋势预测，显示出了重量与体积的减小（Kawai，2003）。预计带嵌入组件的印制电路板可以降低生产成本与设计负担。

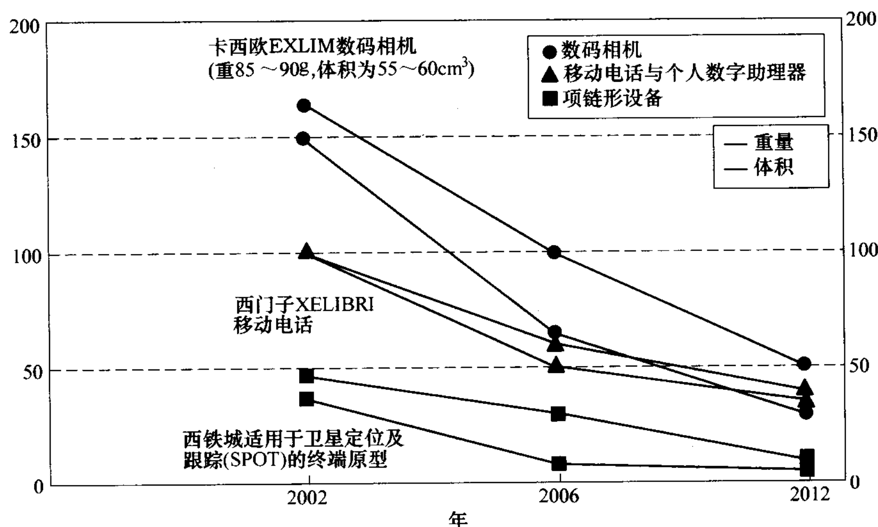


图 1-16　数码相机与移动电话平均重量与体积的预测

（经 Kawai 同意重绘，2003）

1.9　印制电路板标准

印制电路板的设计、生产、组装与测试是一个复杂的过程，涉及了多个因素，因此有必要将印制电路板技术的各方面规范化，从而就生产高品质电路板达成普遍共识，形成一整套被国际社会普遍认可、各商业伙伴共同发展并一致接受的行业标准。

国际标准化组织（ISO）对该标准的定义为：“备有证明材料的协议，其中包含始终用作规则、原则或性能定义的技术规范或其他明确标准，以确保材料、产品、过程及服务适合于目的”。

制定标准的目的是定义某种产品，以便用相同的尺度评价其质量。对任何一种商业活动来说，标准都是必不可少的。因为如果没有明确的要求，生产商就无法确定产品规格，尤其是质量要求。标准帮助购买者检查所提供商品的可接受性，也就是说，标准使购买方与供应方在建立验收准则时有了共同的基础。

标准是基准点，它完全决定产品、工具与质量要求。人们制定的标准不仅要能够帮助购买者选择可满足其特定需求的恰当产品，还应有助于消除生产者与购买者之间的误解，推动产品互换性提高与性能改进。

大多数标准都是国际通用的，可使一国生产的组件与设备能符合他国要求，从而避免了设备出口时的重新设计。标准的制定是为了实现竞争以满足特定需求。

电子产品拥有全球市场，大多数生产商都涉及其中，希望制定全球化标准以便其生产产品，同时也可以利用世界各地的设计者。因此，国际标准对于将某种产品推向市场有着举足轻重的作用（Ferrari，1997）。

位于瑞士日内瓦的两个国际标准组织分别是：ISO 与国际电工委员会（IEC）。

ISO 的工作重点是制定机械硬件、质量与数字标准。IEC 的工作领域主要是设备用电子产品，包括组件、连接器、印制电路板、表面贴装技术与自动化设计等。

在制定与印制电路板有关的标准与技术规范的过程中，国际社会做了大量工作，主要参与机构有：

1）电子电路互连与封装协会（IPC）；

2）美国国家标准学会（ANSI）[㊀]；

3）国际电工委员会（IEC）；

4）美国国防部（DoD）；

5）德国工业标准化委员会（DIN）

IPC 为一个美国商业协会，其参与制定的印制电路板产业相关标准被全球业界采用。该协会通过制定标准促进供应方与购买方之间的交流，并为行业内部各领域制定原则，研究解决产业问题，对比产业测试方法，鼓励互连技术领域的新发展。

㊀ 现已更名为美国标准协会（ASA）。——编辑注

印度印制电路协会（Indian Printed Circuit Association（www. ipcaindia. org），IPCA）也通过教育、交流、研讨会与专题研究等形式参与并推动了行业标准的制定与实施。最初的电子电路互连与封装协会的标准由该协会制定。

1.10　几个常用标准

IPC 制定的几个常用的重要标准是：

1）IPC-T-50F：电子电路互连与封装的术语与定义。以描述与插图的形式帮助使用者及其客户掌握行业语言，包括技术术语缩略语及索引。

2）IPC-S-100：标准与技术规范指南。包括从设计、组装到测试等互连技术各个方面的技术规范以及最终标准的完整汇编。

3）IPC-M-106：设计技术参考手册。覆盖印制电路板技术领域，包括高密度互连、柔性印制电路板设计、阻抗控制、布线图质量与可靠性设计过程中曝光技术的应用。

4）IPC-D-859：厚膜多层混合电路设计标准。涉及多层混合电路设计的各种要求与注意事项。

5）IPC-6801：增层/高密度互连印制电路板 IPC/JPCA 术语与定义、测试方法及设计案例。列举高密板专用术语，材料与高密板、抗撕强度、热振荡测试方法以及高密度互连印制电路板设计标准表与标准制定背景信息。

6）IT-30101：高密度印制电路板微孔评估。详细叙述微孔技术在高速/高频设备中的适用性。

7）IPC-MI-660：原材料入厂检验手册。包括入厂原材料背景信息、应用技术规范参考与业内检测方法。入厂原材料包括层压板、多基板材、各种互连基板、阻膜与其他覆膜、化学处理助剂、底片、对准仪、辅助设备、焊材、辅助加工工具与其他材料等。

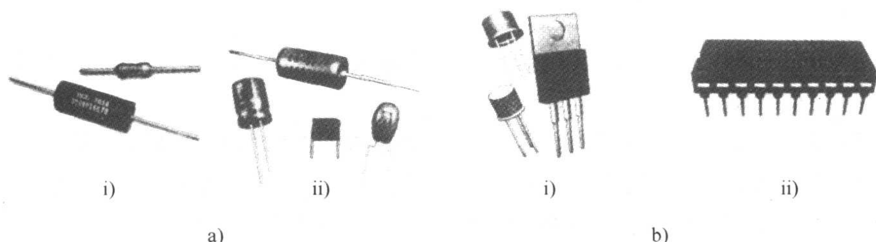
第2章　电子元器件

2.1　电子元器件基础

电子元器件泛指任何能够处理电信号的设备。电子元器件有各种不同的形状和大小，而且根据其不同的功能，用途也各异，因此电子设备中会用到多种元器件。下面将介绍一些电子元器件的基本特点。

2.1.1　有源元器件和无源元器件

主要有两种元器件（见图2-1）：无源元器件和有源元器件。



i)　ii)　i)　ii)

a)　b)

图2-1　元器件类型

a）无源元器件　b）有源元器件

i）电阻　ii）电容　i）晶体管　ii）集成电路

1. 无源元器件

无源元器件不能对电路或系统进行功率放大。它没有控制作用，而且只要输入一个信号就能工作。由于无源元器件的放大倍数一般都小于1，所以它不能使信号产生振荡或对信号进行放大。一组无源元器件会减弱电子信号的值，改变信号的相位，阻止错误频率的信号通过，控制复杂的电路，但它们不能增大信号值，因为它们没有放大功能。无源元器件包括电阻、电容和电感线圈。

2. 有源元器件

有源元器件能控制电压和电流，并能在电路中起到开关作用，它能扩大或描述一个信号。有源元器件包括二极管、晶体管和集成电路，它们一般都是半导体。

2.1.2　分立电路与集成电路

当一个元器件被安装在电路上起到一两种作用时，它被叫做分立元器件。

例如，用来减弱电流的电阻就是一个分立元器件。而集成电路则是把许多相互关联的分立元器件组装在一个载体上，来实现多种功能。集成电路的典型例子就是多功能的微处理器。

2.1.3 元器件的引脚

元器件可根据其与电路板连接方式的不同分为两种：穿孔元器件和表面贴装元器件。穿孔元器件（见图 2-2a）有引脚能插入电路板上的安装孔，表面贴装元器件（见图 2-2b）能直接安装在电路板表面。

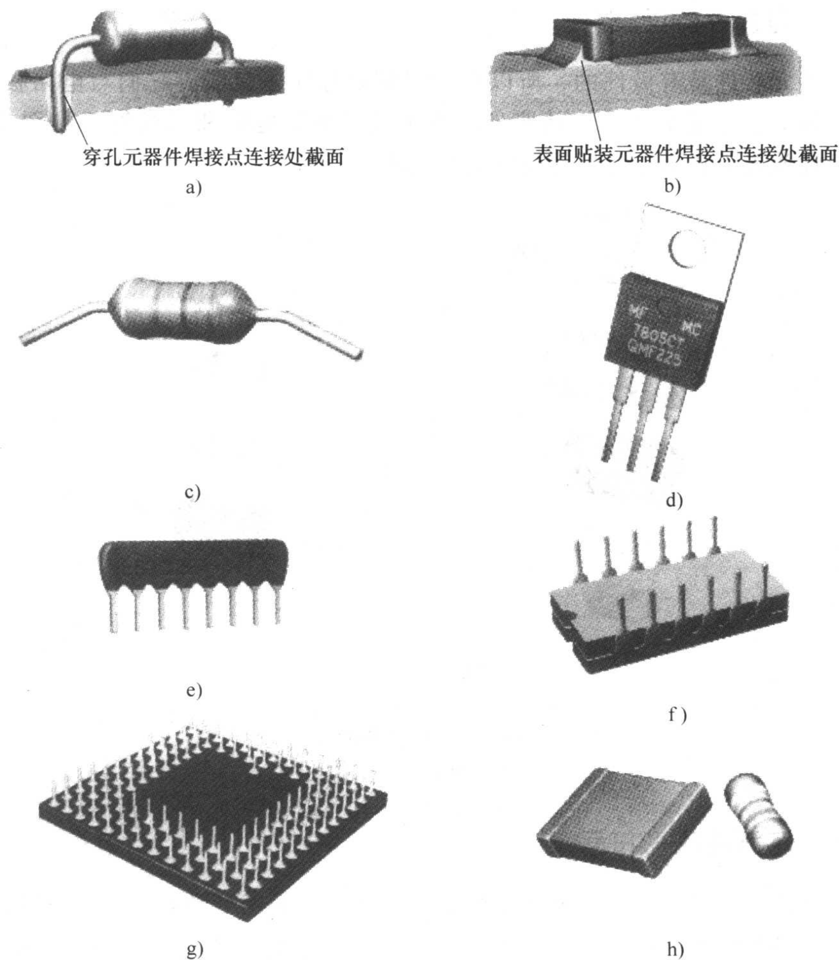


图 2-2　按引脚类型进行的元器件分类

a）穿孔元器件　b）表面贴装元器件　c）轴向引脚元器件　d）径向引脚元器件　e）单列直插式封装元器件　f）双列直插式封装元器件　g）网格插针阵列元器件　h）无引脚元器件

分立元器件的引脚通常有两种构造类型：轴向引脚（见图2-2c）和径向引脚（见图2-2d）。轴向引脚的元器件有两条引脚，像手臂一样从元器件两侧伸出，这些引脚要被弯曲插入印制电路板上的插孔，而径向引脚则像腿一样从元器件的底部伸出。

集成电路有许多引脚，有单列的（见图2-2e），有双列的（见图2-2f），这些引脚都能插入印制电路板上的插孔。高密度集成电路现在已经发展到了网格插针阵列（见图2-2g），它的引脚排列在元器件底部四周。有些表面贴装元器件并无金属引脚（见图2-2h），它们是通过某种金属终端贴在电路板上的。

2.1.4　有极性的元器件

有些元器件是有极性的，所以有的引脚要标注正负极。它们与电路板连接时，必须对应好正负极性，其典型的例子就是电解电容和二极管（见图2-3）。如果极性放置不正确，元器件很可能被损坏。

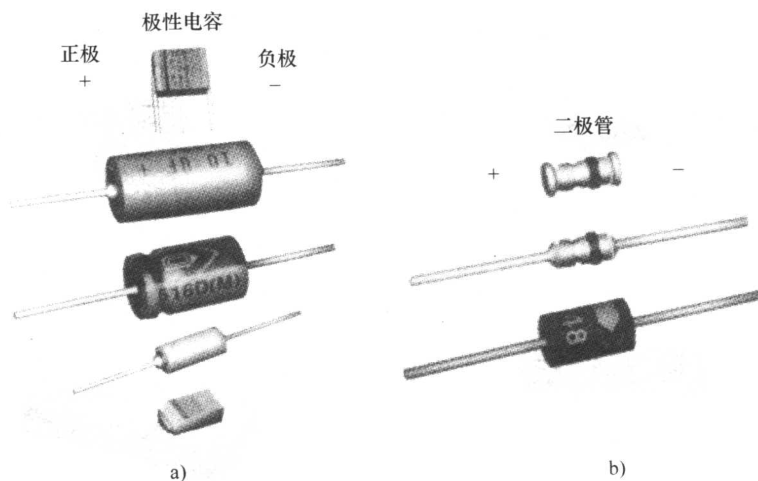


图2-3　有极性元器件
a）极性电容　b）二极管

2.1.5　元器件图形符号

在电路原理图中，每个分立元器件都有其各自的图形符号（见图2-4）。这些图形符号都已被标准化，并列入了电气及电子工程师学会（IEEE）标准315和315A（ANSI Y32.2）。在电路原理图中，集成电路并没有特定的符号，通常都是用一个方块来表示。

下面，将从基本功能、作用原理、详细构造和图形符号等方面对一些常用

图 2-4　常用元器件的电路图形符号
（参照 IPC-DRM-18F“元器件标识”重绘）

元器件进行介绍。

2.2　电阻器

电子设备中最常用的元器件就是电阻。它是无源元器件，在它的两条引脚间产生电阻，电阻的大小可以控制。电阻的定义是：由导体、电路组件或电路产生的对电流的阻碍。它与电流的关系是

电阻 = 电压/电流　　（欧姆定律）

电阻的单位是欧［姆］（符号是 Ω）。1000Ω 写做 1kΩ，1000kΩ 写做 1MΩ。电阻的图形符号如图 2-5 所示。它的图形符号是由连续的波峰波谷组成的锯齿形状，这个符号不用工具就可以简单画出，它也可以用里面写着 R 的矩形表示。

图 2-5　电阻符号

2.2.1　电阻器的分类

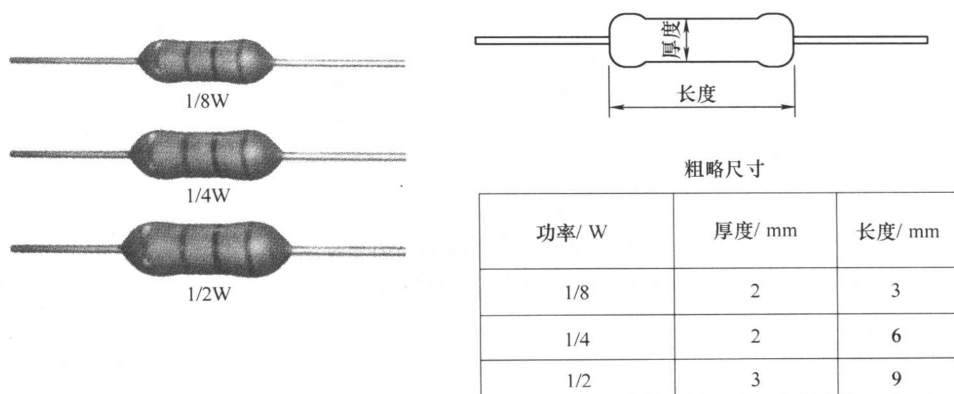
电阻器分为两类：固定电阻和可变电阻。也可以根据其所用材料的不同来分类，以下是一些最常用的电阻种类：

1）碳膜电阻：它是由细小碳末与树脂粘结剂、绝缘材料相混合制成的，还可以通过在陶棒上镀上碳膜的方法制作。

绝大部分的碳膜电阻都有小的寄生电容和电感，因此它们可用于高频电路中。但是，它的偏差限制在 1%，并且容易受到温度和振动的影响（见图 2-6）。

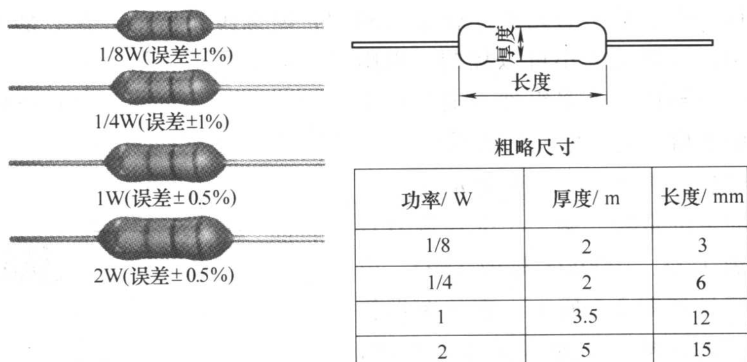
2）金属膜电阻：它是将金属膜覆在陶瓷棒、金属釉（金属和玻璃的混合物）或金属氧化物（金属和一种绝缘氧化物的混合物）上制成的。

金属膜电阻不易受到温度和振动的影响，偏差接近 0.5%。市面上还有偏差小于 0.1% 的精密金属膜电阻出售（见图 2-7）。



功率/ W	厚度/ mm	长度/ mm
1/8	2	3
1/4	2	6
1/2	3	9

图 2-6　碳膜电阻



功率/ W	厚度/ m	长度/ mm
1/8	2	3
1/4	2	6
1	3.5	12
2	5	15

图 2-7　金属膜电阻

3）线绕电阻：线绕电阻是将电阻线绕在绝缘体上制成的。它的偏差可以被控制到很小。

4）厚膜电阻网络：厚膜电阻网络是将稀有金属嵌入到一个玻璃制绑定系统，这个系统被覆在陶瓷衬底上并经过高温烧制而成。这种网络有小型化、包裹结构、性能稳定、不易发生重大故障的特点。市场上现有的厚膜电阻网络可以包含 1 ~ 50 个电阻，常用的是 5 ~ 20 个。其封装形式一般为单列直插封装、双列直插封装和方形封装。

图 2-8 是两种单列直插封装厚膜电阻网络的结构示意图。电阻网络是由许多相同阻值的电阻组成的，每个电阻的一边都与其他电阻的一边相连。如图 2-8 所示，组件里有 8 个电阻，每条引脚都连接一个电阻，最左面的第 9 个引脚是 8 个电阻的公共引脚。这种封装结构的典型应用就是在电路中为多个发光二极管控制电流。此外，许多电阻网络的顶部都印有“4S”，它表示组件里有 4 个独立的

电阻，它们并没有连在一起。组件的外壳上有 8 个引脚而不是 9 个。尺寸方面，9 个引脚的组件厚为 1.8mm，高为 5mm，宽为 23mm；8 个引脚的组件厚为 1.8mm，高为 5mm，宽为 20mm。

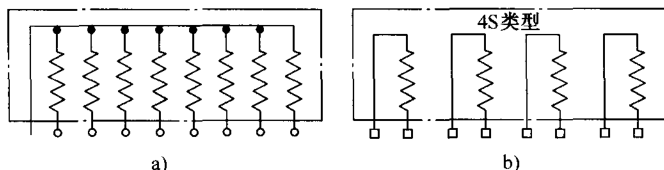


图 2-8 两种单列直插封装厚膜电阻网络的结构

之所以制作电阻用到了这么多种材料，是为了满足其成本和各种性能的需求。比如，低噪声、高稳定性和较小的体积。

2.2.2 电阻器的封装

电阻的物理结构一般是将电阻材料装在陶瓷制或玻璃制的圆柱体或矩形载体里，用封帽把载体里的电阻物质压紧。带轴向引脚的圆柱体形式比较常见，而带径向引脚的圆柱体形式，或是双列直插封装的电阻阵列或网络则用得相对较少。图 2-9 所示为常见的电阻封装形式。

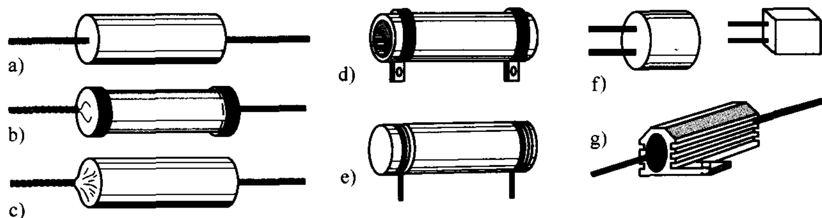


图 2-9 常见的固定电阻封装形式（经 Leonida 同意重绘，1981）

注：a、b、c 为带轴向引脚的圆柱体形式；d、e 为带径向引脚的圆柱体形式；f 为带径向引脚的纵向形式；g 为带轴向引脚的大功率形式（铜制外壳，便于散热）。

2.2.3 电阻器的性能参数

下面是电阻主要性能参数的相关概念。

1）电阻：25℃下测量的电阻两条引脚间的电阻标称值。

2）偏差：实际电阻与电阻标称值的最大偏差，通常用电阻标称值的百分比表示。例如：偏差为 ±5% 的 500Ω 电阻，它的电阻范围在 475 ~ 525Ω 之间。

3）功率：70℃下电阻持续所做功的最大值，单位为瓦特。70℃以上，标称功率则根据生产厂商提供的衰减系数递减。大部分电阻的功率是 0.25W 和 0.5W。现代的数字电路电流很小，一般用 0.125W 电阻。

碳膜电阻和金属膜电阻的功率一般为250mW、500mW、1W和2W。需散热较多时，多采用线绕电阻，其功率可达25W。

4）电阻温度系数：它表示电阻值随温度变化的程度，通常用每摄氏度标称值的百万分比表示（$10^{-4}\%/℃$）。大多数电阻温度系数介于25～500×$10^{-4}\%/℃$之间。

碳膜电阻稳定性不高，电阻温度系数也较大，一般为1200×$10^{-4}\%/℃$。金属膜电阻不论是存放或工作状态，其电阻温度系数相对较低（±250×$10^{-4}\%/℃$），稳定性也较高。

电阻的临界温度是指热点温度，是环境温度和做功散热温度的总和。由于电阻的结构均匀，最高温度在电阻的中部，这就是热点温度。

5）稳定性或漂移：是指随时间推移，电阻阻值变化的大小。通常是由电阻在70℃下工作1000h后，电阻值变化的百分比来表示的。电阻稳定性是指电阻值随时间变化的百分比，它取决于电阻功率耗散和环境温度。

6）噪声：由于电子运动，电阻会产生白噪声和约翰逊噪声，噪声大小与制作技术有关，它一般用μV/V表示。噪声随电阻值和使用频率的升高而增大。在27℃下，100kΩ电阻在带宽为5kHz时，其噪声电压值一般为8.3μV。

7）寄生效应：没有电阻是理想的，电阻应该是一个如图2-10所示的集总模型，电阻与旁路电容并联，与电感串联，因此电阻的阻抗与频率有关。然而，20kΩ的小薄膜电阻（<500mW）在100MHz频率范围内或小于1kΩ的电阻在300MHz频率范围内工作时，可被看作是理想的电阻。

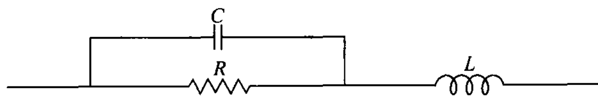


图2-10　（带引脚）电阻集总模型（$C=0.1\sim2pF$、$L=0.1\mu H$）

8）最大电压：它表示电阻能安全持续使用的最大直流电压。对于100Ω或更大的电阻来说，最高电压是1000V。即便是电压短暂地高于额定值，也会导致电阻值的永久性改变。

9）标称阻值：电阻值标示在电阻表面，既可用数字表示，也可用色环表示。在色环表示方法中，数字0～9分别用一种颜色来代表。

电阻上有4条色环（见图2-11），离电阻边缘最近的第1条色环表示电阻值的第1位数字，第2条表示第2位数字，第3条表示小数点的位置，从而可以得出具体的电阻值，而第4条则表示偏差。如果没有第4条色环，那么偏差为±20%。

5条色环中（见图2-12），前3条表示阻值，第4条表示乘数，第5条则表示电阻偏差。



图 2-11　碳膜电阻和金属膜电阻的色环——4 条色环



图 2-12　碳膜电阻和金属膜电阻的色环——5 条色环

有的电阻有 6 条色环，第 6 条色环表示电阻温度系数，单位是 $\times 10^{-4}\%/℃$。

当值和偏差印制在电阻表面上时，偏差用符号表示如下

F = ±1%　G = ±2%　J = ±5%　K = ±10%　M = ±20%

举例说明如下：

R68M 表示 0.68Ω ±20% 的电阻

5K6J 表示 5.6kΩ ±5% 的电阻

82KK 表示 82kΩ ±10% 的电阻

虽然可以制作任何阻值的电阻，但一般都会预先规定好阻值。最常用的是 E12 系列，预先规定的阻值是 10、12、15、18、22、27、33、39、47、56、68、82。E96 系列的各预设阻值更接近，它们之间相差 ±1%。

2.3 可变电阻和电位器

可变电阻是由一些电阻材料和与之接触的滑动触片组成的。可变电阻和电位器（英文简写为“pot”）根据所用电阻材料的不同可分为三类（见图 2-13）：

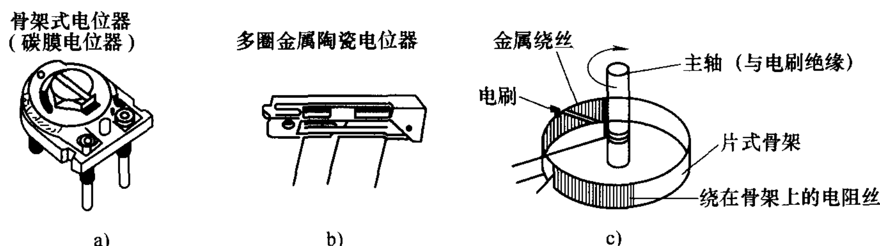


图 2-13　可变电阻种类

a）碳膜电阻　b）多圈金属陶瓷电位器　c）线绕电位器

1）碳膜电位器：碳膜电位器既可由模压碳合成物制作，也可用在衬底上镀上碳和绝缘填充物的涂层的方法制作。

2）金属陶瓷电位器：金属陶瓷电位器是用在陶瓷衬底上镀上厚的电阻膜的方法制作的。

3）线绕电位器：用镍铬铁合金或其他电阻线绕在一个绝缘骨架上制成。

电位器可以根据电阻数量及控制方法分成以下几种类型：

1）单连电位器：只有一个电阻的电位器；

2）双连电位器：由一个主轴控制两个相同的电阻；

3）双重电位器：由两个独立同轴心的主轴控制两个电阻；

4）多圈电位器：用旋钮或齿轮进行调节的电位器，它的主轴可能多达 40 多转；

5）罐状电位器：矩形的电位器，既可以是单圈电位器，也可以是多圈电位器。

电位器通常用于调节晶体管的偏置电压、RC 定时器的时间常数、放大器的增益以及控制电路的电流和电压。所以，它们的封装形式要适于印制电路板的

安装应用。

可变电阻既可以用作变阻器，也可以用作电位器。图 2-14 给出了这两种应用的不同之处。用作变阻器时，可变电阻连接在基准电压源和滑动头之间，通过滑动头的滑动可获得所需的电压。

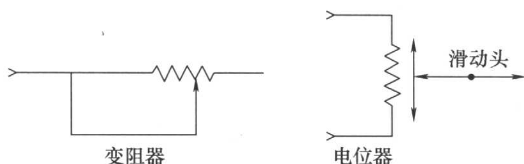


图 2-14　变阻器和电位器在使用上的区别

用作电位器时，可变电阻的两端与电路相连，滑动头与其中一端相连。也就是说，整个电阻是一个串联结构，而滑动头连在其他电路中。这种结构也可以用作分压器。

可变电阻的阻抗变化会遵循以下规律之一：

1）线性变化：整个电阻器中电阻分布均匀。

2）对数变化：电阻器中电阻按照对数法则变化。当电刷移动时，电阻会慢慢地从 0 逐渐增长到电阻阻值的一半，而当电刷继续向远端移动时，电阻的增长速度会快得多。

图 2-15 为线性可变电阻和对数型可变电阻阻值随电刷旋转角度的变化关系。

3）正余弦电位器：顾名思义，正余弦电位器的电阻变化遵循正余弦规律。整个 360°的运行轨迹被分成 4 个象限，每个象限 90°。

图 2-16 是一些常见可变电阻的封装形式。

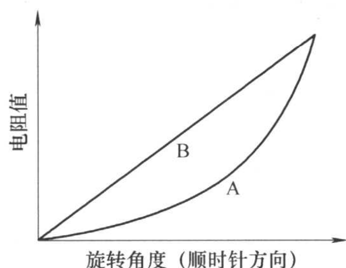


图 2-15　可变电阻的阻值随旋转角度变化

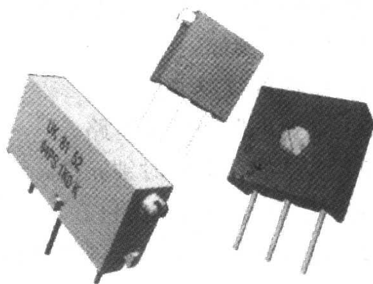


图 2-16　可变电阻的封装形式

2.4　光敏电阻

光敏电阻（LDR）是由硫化镉制成的。当处在黑暗中时，它的自由电子很

少，因此会产生很大的电阻。当它处在光亮中时，电子开始活跃，物质的导电性变强。当光线被遮住后，电子又恢复稳定，而物质导电性变弱或彻底绝缘。光敏电阻在无光状态下的电阻是 $1\sim10\text{M}\Omega$，有光状态下的电阻是 $75\sim300\Omega$，这两种状态的转换需要一定的时间，这个时间叫做转换时间（恢复时间），通常恢复率为 $200\text{k}\Omega/\text{s}$。

2.5 热敏电阻

热敏电阻有很高的电阻温度系数。最常见的是负温度系数的热敏电阻（电阻值随温度升高而降低），它们是锰、钴、镍等金属的氧化物。根据用途不同，热敏电阻有不同的形状和样式，有盘状的、珠状的、圆柱体状的。热敏电阻电阻的温度性能是非线性的，但是通过合理地串联和并联，它的电阻变化在一定的温度范围内有可能呈近似线性。

有正的电阻温度系数的热敏电阻被称为正温度系数热敏电阻。它由钛酸钡制成，当温度稍有变化时，电阻就会有很大的变化。

热敏电阻有很多用途，例如，过载限流器，温度传感器，电动机、洗衣机、报警器等各种设备的过热保护装置等。它还可用于温度调节器、延时设备和补偿电阻。由于其用途的特殊性，热敏珠需要被很好地保护起来，要把它嵌入玻璃管的顶端或是放在不锈钢罩里。

2.6 电容器

电容像电阻一样，也是无源元器件，能用来储存电荷。电容广泛用于电力和电子领域。例如：

1）电源的纹波滤波器；

2）谐振电路，振荡电路；

3）多谐振荡器的时钟元件，延时电路；

4）放大器的耦合电路；

5）电源和放大器的去耦电路；

6）温度调节器和继电器触头的火花抑制器。

电容器由两块平行的导电金属板组成，金属板被称作电极，它们之间用绝缘体隔开（见图 2-17）。绝缘体可用纸质、云母质、陶质、塑料质的薄膜或薄片制作。制作电容时，引脚分别从每个金属板或电极引出。当有电压 V 接到电容时，电荷 Q 被储存在电容里，其公式为

$$Q = CV$$

式中，C 为电容器的电容。

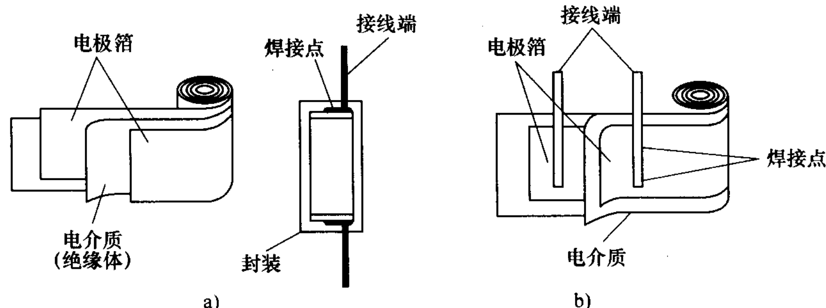


图 2-17　常见的电容器

a）露箔式电容器　b）埋置式电容器

电容量的单位是法拉。在 1V 电压下，当电容器存储 1C 的电量时，电容器的电容量就是 1F。法拉的单位太大，通常使用较小的单位有微法（10^{-6}F）和皮法（10^{-12}F）。

既有可变电容，也有固定电容。图 2-18 为各种电容的图形符号。

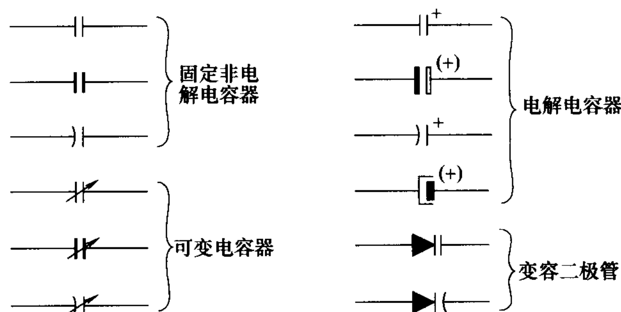
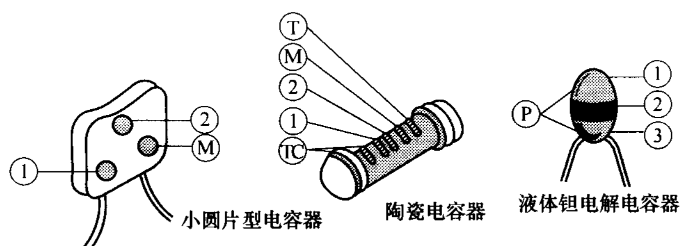


图 2-18　电容图形符号

注：正极用符号（+）表示。

电容值标注在电容表面，既可用数字表示，也可用色环表示。图 2-19 为各种电容的色环。

电容值有时也用数字写在电容表面上。最初电容值为小数时一般是以微法（μF）表示，后来以皮法（pF）为单位。四位数字的值是以皮法为单位的，但没有倍率。还有的电容值是以三位数字表示的，类似于色环，用数值和倍率表示。例如，203 表示电容值为 20 后加上 3 个 0，也就是 20000pF 或 0.02μF。偏差用字母表示：F = ±1%、G = ±2%、J = ±5%、K = ±10%、M = ±20% 和 Z = −20% ~ +80%。



①② 和③ 表示第一、第二和第三条重要的标记

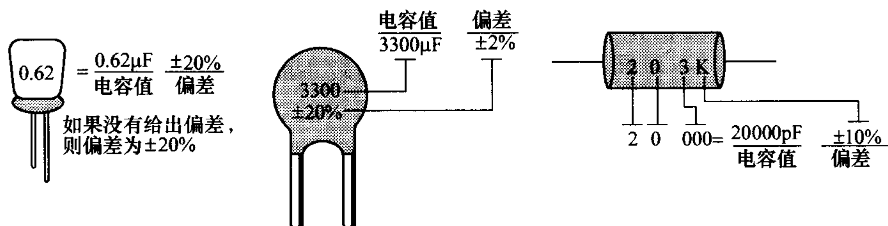
Ⓜ 倍率　Ⓣ 偏差

TC 温度系数

一些电容器没有标注Ⓣ和/或TC色环

Ⓟ 正极 (+) 和额定电压

a)



b)

图 2-19　各种电容的色环

a）色环标注的电容　b）数字标注的电容

2.6.1　电容器的分类

电容器根据所使用绝缘材料的不同可以分成很多类（见图 2-20）。电容量的大小、偏差和工作电压也与绝缘材料有关。以下是一些常见的电容类型。

1. 纸介电容器

纸介电容器是用薄纸卷和铝膜制成的。为加强绝缘性并防止受潮，纸被涂上了油或是蜡，电容器通常会覆上树脂。纸介电容器一般较大，因为纸和覆膜都比较厚。敷金属电容的厚度要小得多，因为它的铝膜是直接镀在绝缘材料上的（见图 2-21）。

常用电容值范围：10nF ~ 10μF；

常用直流电压：500V（最大）；

偏差：±10%。

2. 云母电容器

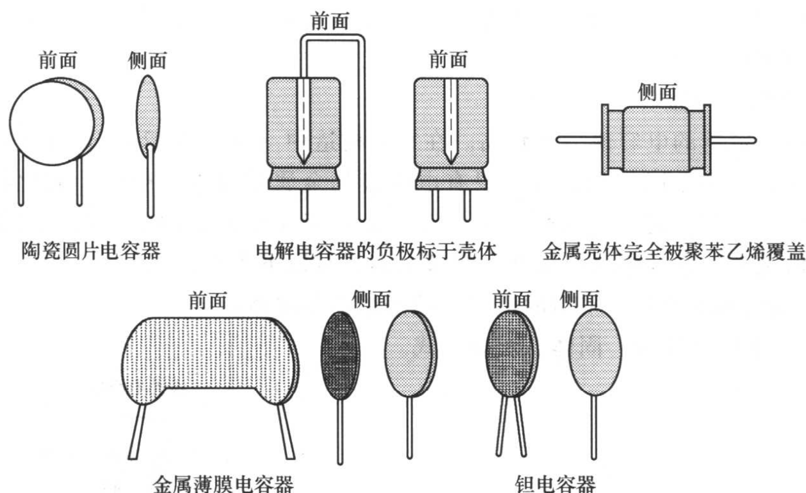


图 2-20　各种类型的电容器

云母电容器是直接把银镀在云母薄片表面，然后将许多这样的薄片叠在一起组成的。云母电容器表面一般用树脂或塑料覆盖。

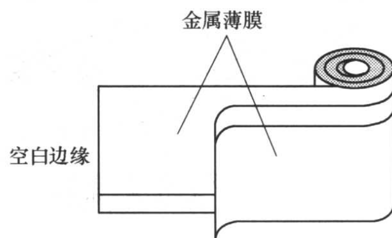


图 2-21　金属电容器的结构

常用电容范围：5pF ~ 10nF；

常用直流电压：50 ~ 500V；

偏差：±0.5%。

3. 陶瓷电容器

陶瓷电容器一般采用钛酸钙作为绝缘体。低损耗的陶瓷电容器用一种天然矿物滑石瓷作为绝缘体。陶瓷薄片两面都镀上了金属，并焊上了引线，它的表面上了许多道漆。现代独石陶瓷电容器是用陶瓷绝缘薄片和电极的交替层组成的，它们被热压成一个独石。这种电容的体积相对较小。

常用电容范围：

1）低损耗（滑石瓷）：5pF ~ 10nF；

2）钛酸钡：5pF ~ 1μF；

3）独石：1nF ~ 47μF；

常用电压范围：对于 1）和 2)：60V ~ 10kV，对于 3)：60 ~ 400V；

偏差：±10% ~ ±20%。

4. 塑料电容器

塑料电容器的结构与纸介电容器非常相似。它也有薄膜和电镀两种类型。聚苯乙烯电容器具有稳定性高、偏差小、温度系数小的特点，应用广泛。但这

类电容体积较大，在要求不高的情况下，通常使用金属化聚苯乙烯电容器，也称作“聚酯电容器”。

5. 电解电容器

电解电容器的电容值一般较高。在它的构造中（见图2-22），阳极金属薄板的表面覆有一层金属氧化物膜，浸有电解液的金属薄板作为阴极。氧化物膜在金属薄板和电解液间起绝缘作用。电解电容器能在如此小的空间内产生如此大的电容值是由于它的绝缘层很薄。电解电容器有以下类型：

1）铝电解电容器：平坦的铝箔、蚀刻铝箔和固体；

2）钽电解电容器：固体、湿烧结式。

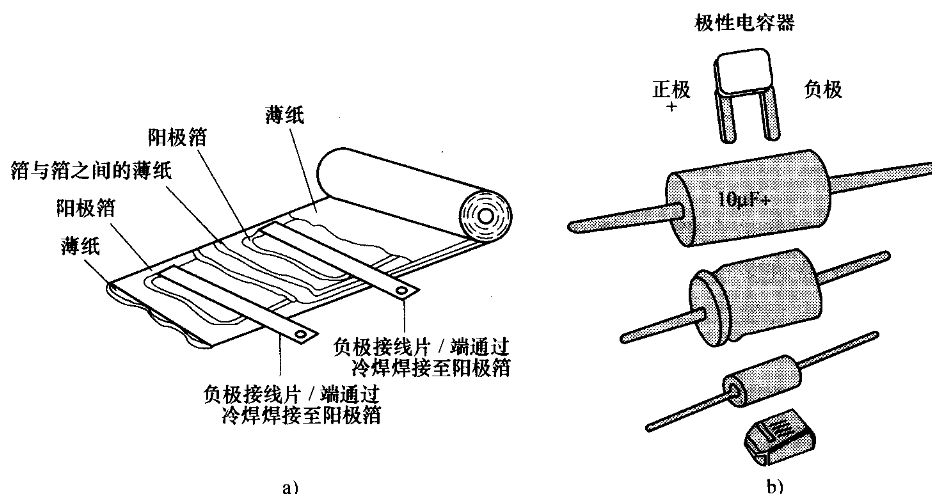


图2-22 铝电解电容器的构造和电解电容器的外形
a）铝电解电容器的构造 b）电解电容器的外形

电解电容器的偏差等级非常多，常见的是 -20% ~50%，电容一般是有极性的。必须注意使用时不要把电压极性接反，如果接反，电解质会从阳极移出，在阴极形成氧化物膜，与此同时，会形成很大的电流。有时从电容中泄漏出的气体会引起电容爆炸，从而损坏电路的其他部件。

2.6.2 电容器的封装

电容有很多种封装方法、形式和尺寸。最常见的封装方法是轴向封装、盘状封装、矩形封装和管状封装等，如图2-20所示。

2.6.3 电容器的性能

以下是电容器的重要性能参数：

1）电容量：25℃时电容器的标称值，单位为法拉（或微法、皮法等）。

2）偏差：电容的实际值与标称值之间的差值，不同类型的电容器具有不同的偏差。

3）工作电压：电容器能持续正常工作的最大电压值，可以是交流或直流电压。能造成电介质永久损坏的电压叫做击穿电压，一般为工作电压的两倍。

4）电容温度系数：电容值随温度改变而产生的变化，单位为 $10^{-4}\%/℃$。

5）直流漏电流：电容器工作时，由于电介质的电导率导致了电流的损失，这个电流量就叫做直流漏电流。

6）寄生效应：电容器的阻抗与频率有关，它有通高频、阻低频的性能。根据不同的电路结构，电容器可以使信号通过，或是将其接地。电容器的阻抗随频率变化的公式为

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

所有的电容器都有一个自谐振频率。在这个频率下，寄生引线和电解质与电容共振，形成串联谐振电路。电容器的阻抗在谐振时不断减小，直到到达自谐振频率，此时阻抗达到最小。铝电解电容器的自谐振频率很低，因此它在几百 kHz 以上的高频电路中是不起作用的。钽电容器的自谐振频率比较适中，因此它可以应用于几 MHz，甚至更高频率的电路中。陶瓷和云母电容器应用最为广泛，因为它们能在高达几百 MHz 的频率下工作。频率极低的电路和定时电路对电容的稳定性要求很高，这些电路中电容的电介质是用纸、聚乙烯、聚丙烯、聚酯制成的，它们的漏电流很小，介质吸收也很小。

等效串联电阻（ESR）是电容器的重要参数，它是由导线、内部电路、金属薄板和电解质共同产生的电阻。图 2-23 为电容器的等效电路。由于 ESR 是电容器在工作频率时呈现的有效电阻，所以它会影响调谐电路的工作状态，它可能会导致像开关电源或电视机和显示器的偏转电路等关键电路的运行错误或不稳定。电源滤波器需要 ESR 较小的电容，这是由于当电流通过电容时，由于电容的 ESR 会引起电压的下降，同时造成功率耗散。与其他电容器相比，电解电容器的 ESR 较高，现正在改进中。

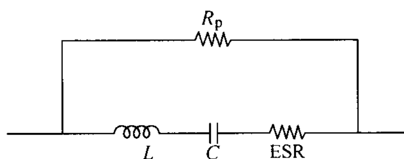


图 2-23　电容器的等效电路

理想的电容器只有电容值（C），而没有电阻值（R）。任何由电容产生的电阻都会阻碍电容器在加载电压时电流的通行，而且会散热，这既会浪费能源，还会导致器件损坏。耗散因数（DF）在数学上定义为 R/X，R 是电容器的电阻，X 是电容器的电抗。R 越高，DF 越大，电容器的性能就越差。从公式 $DF = R/X$

中，可明显看出，*DF* 是 *X* 的反函数，*X* 降低，*DF* 增大，反之亦然。*DF* 随频率成比例地变化，表明 *DF* 是测试频率的函数。*DF* 是测试电容器质量的参考，而测试数值只有在测试频率下才是准确的。R_p 代表电容器的并联电阻，它的值一般为几百 MΩ。除电解电容外，它的电阻值相对较小。

品质因数 *Q* 是指电抗纯度。例如，它几乎近似于一个纯电阻，或是没有电阻，它代表了元件储存的电量与流失电量之比。*Q* 是无量纲的单位，表达式为 $Q = X/R$。然而 *Q* 多用于电感器，而电容器则主要用 *DF* 表示纯度，*DF* 与 *Q* 互为倒数。

2.7 可变电容

可变电容使用陶瓷、云母、聚乙烯或聚四氟乙烯作为电介质。可变电容器有一个定片和一个动片，定片是固定的，动片可在 0～180°范围内旋转，以改变极板暴露部分的大小，从而改变电容值。

对于大多数可变电容器，随着动片的旋转，其电容值的变化是线性的。图 2-24 表明动片旋转 360°时，电容值的线性增加和减小。

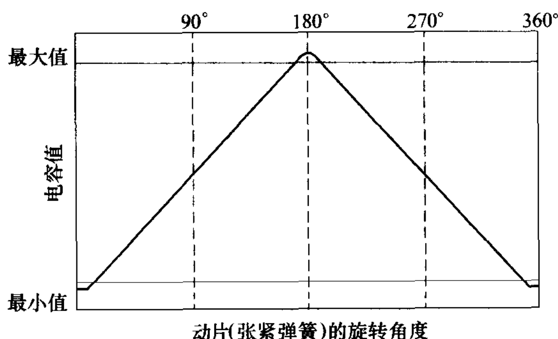


图 2-24 可变电容器转子旋转时电容值的线性变化

可变电容器主要有以下两种结构：

1）按钮型：这种结构有一个可变的动片（见图 2-25a）；

2）管状型：这种结构有一个可调的轴心（见图 2-25b）。

值得注意的是，如果把金属螺钉旋具放在电容器调节螺钉上或取开时，电容的大小会改变。这是因为当金属螺钉旋具放在调节螺钉上时改变了定片，更多的是改变了动片金属板表面有效区域的大小。因此，调节电容值时推荐使用非金属螺钉旋具。

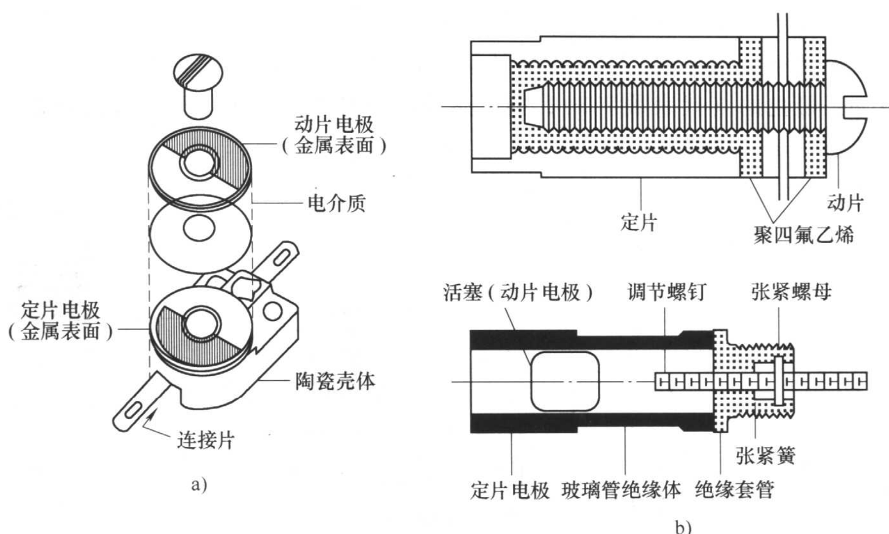


图 2-25　可变电容器

a）按钮型　b）管状型

2.8　电感器

电感器是那些抑制电流变化设备的标志。电感器的工作原理是，当电流通过一个线圈时，会产生磁场，而断开电流时，磁场消失，磁场消失时会产生一个电动势使电流续存。当线圈的电流改变时，产生的感应电动势的方向会阻止电流的变化。感应电动势

$$e = -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

式中，L 是电感系数，单位为亨利；$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$是电流的变化率。1H 电感是指当电流以每秒 1A 速度变化时，将感应产生 1V 的负电动势。电源中使用几亨利的电感起到平滑扼流作用，而音频和射频电路中会采用更小的电感值（毫亨或微亨）。

电感器有时被称作电感线圈。图 2-26a 是电感器的图形符号，电感器有多种形状和大小（见图 2-26b）。

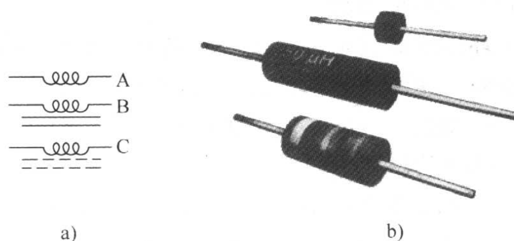


图 2-26　电感器的图形符号和电感器的形状

a）电感器的符号　b）电感器的形状

电感值的大小会以数字或色环的形式印在电感器的表面上（见图 2-27），与电阻的标法很相似。例如，电感器的前 2 条色环是红的（代表数字 2），而第 3 条色环是橙色的（代表数字 3），则电感器的值是 22000μH。第 4 条银色色环表示它的偏差是 ±10%。

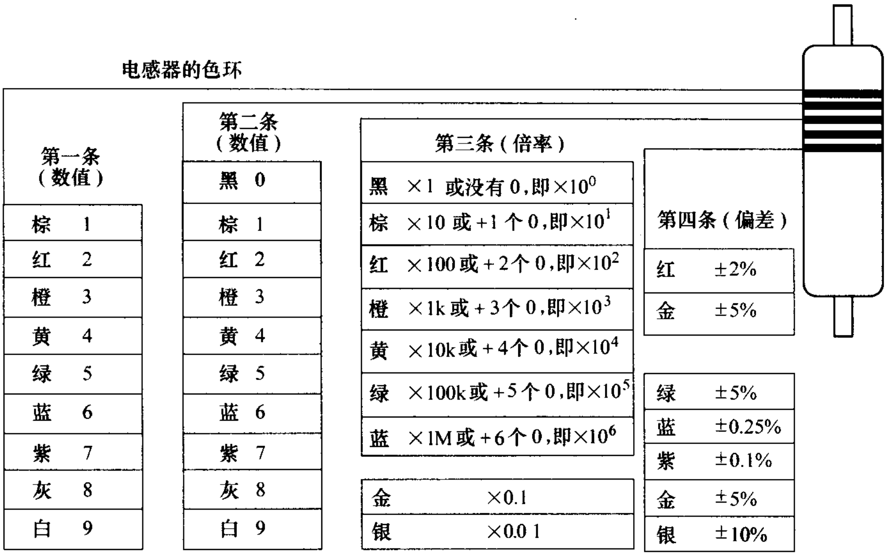


图 2-27 电感器的色环

电感器最主要的用途就是滤波。滤波电感器有两种截然不同的类型：大电流电感器有一个很大的磁心，一般用于电源滤波器，而小电流空心电感器用于信号滤波。

电感器的基本组成是骨架、绕组线（带或不带隔离材料）和磁心材料。骨架是由模压塑料制成的，是绕组线和磁心的载体。骨架的模压塑料里一般都有终端引脚，绕组线一般是由漆包铜线制成的，漆包铜线的直径选取应保证其以最大功率工作时，温度不会过高。磁心材料可由叠压钢片、铁粉或铁氧体制成，磁心有很多种形状。

环形线圈就是将铜线绕在圆柱形的磁心上。这样可以使线圈产生的磁通不会泄漏，线圈的效率较高，并可使磁通对其他组件的影响较小。铁氧体制成的环形线圈效率最高，但很难把它缠好。图 2-28 是各种形状的环形线圈，以及这些电感器的磁通走向。

空心线圈多用于高频电路中。为了提供机械保护或减少高压电晕的影响，电感器可能会被包上环氧树脂，但一旦包上环氧树脂，寄生电容就会增加，并会导致电感器很难修理，甚至无法修理。图 2-29 是几种常见的电感器及其应用。

大电流电感器要求把磁心损耗控制在一定范围内，并且拥有较高的性能。

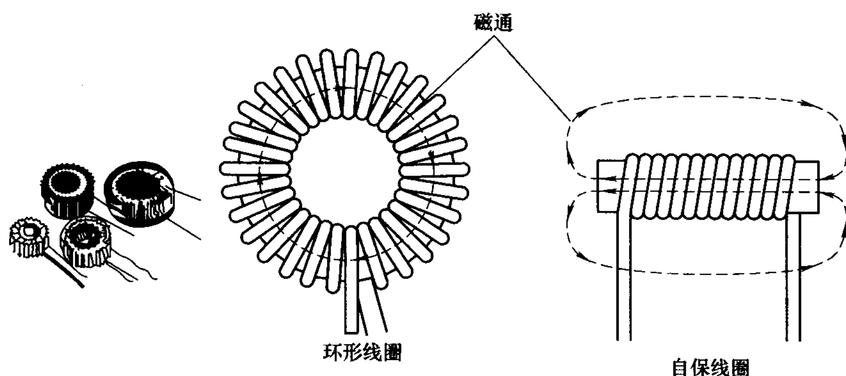


图 2-28　各种形状的环形线圈

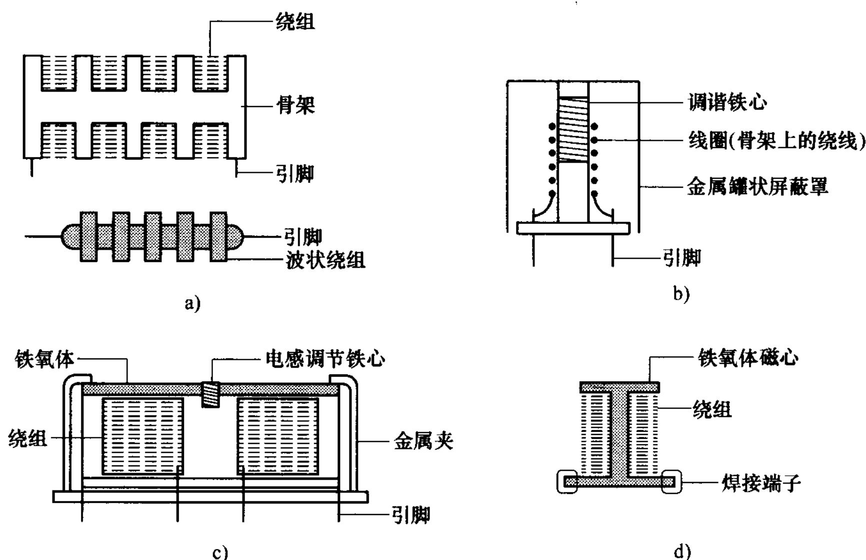


图 2-29　电感器类型

a）分布式电感器　b）射频线圈　c）杯状或轴状电感器　d）表面贴装电感器

它的磁心又大又重，所以它的尺寸和重量很大。开关电源需要范围较大的电感器或变压器，以控制开关噪声并对输出电压进行滤波。

小电流电感器用在信号处理的滤波电路中。一个电感/电容滤波器比电阻/电容滤波器斜率更大，因而具有更好的滤波作用。总的来说，电感器在电源电路之外很少用到。

电感器的类型和形状比电容器和电阻器都要多，这是因为不同的设备需要用不同的电感线圈以适应各自不同的需要，比如射频线圈、音频滤波器、电源

扼流器等。

电感值可调的电感器也是很有用的。电感器的铁氧体磁心做得像一个螺钉，这种电感器的磁心可用螺钉旋具旋入或旋出，最好用塑料螺钉旋具来调节线圈。通过旋入或旋出铁氧体磁心，线圈的电感值就会改变。

2.9 二极管

二极管是一种有源元器件，只有一种方向的电流才能通过它，它是用半导体材料制成的。顾名思义，二极管有两个电极：一个电极用 N 型半导体材料制成；另一个电极则是用 P 型半导体材料制成。两种不同的材料导致了二极管的特殊性能。电路中二极管的主要功能是开关作用，用作检波器或整流器。

二极管是由两种成分构成的元器件，它有两个电极，电路图形符号如图 2-30 所示。阴阳两极由金属材料分别从两端引出，并在二极管的表面予以标识，箭头方向即是电流可以流过的方向。对于玻璃封装的二极管，阴极用一条线、一排线或一个点表示。大多数硅、锗二极管上带有一排线条，线条的颜色表明了元器件的制造厂件号。

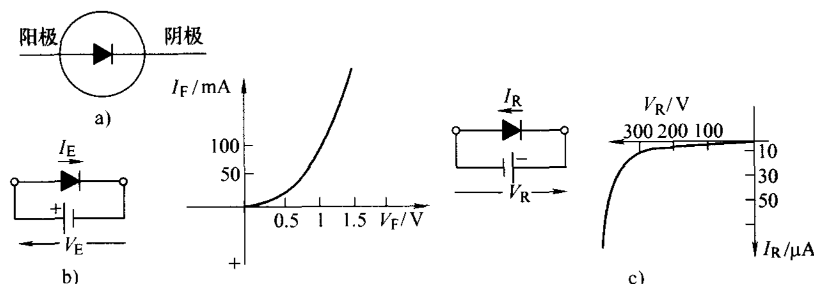


图 2-30 二极管

a) 电路符号 b) 正偏压时的电压/电流图 c) 反偏压时的电压/电流图

注：坐标刻度不同。

常规二极管一般会有一个较低的正向电阻和一个很高的反向电阻。这种电阻的变化是由二极管非线性的电压/电流性能决定的。图 2-31 所示是一个典型的半导体二极管的电压电流图。

小信号二极管是一种常用的二极管，它适用于小电流和电压范围很宽的场合，电压有时可达 50kV。开关二极管在电压反向时，可以很快地从导通状态转换到不导通状态，反之亦然。整流器与小信号二极管很相似，但更适用于大电流电路中。小功率和中功率二极管一般采用轴向设计，而大功率二极管可采用大小、形状各异的多种设计。超大功率二极管有螺纹用来安装在印制电路板中或散热片上。图 2-32 所示为商用二极管常见的封装形式，供应商提供的数据单

一般会介绍二极管的外形和大小。还有像集成电路一样的二极管阵列和二极管网络，最多可容纳 48 个二极管。

用于整流时，单个二极管可提供半波整流，4 个二极管联合使用时可完成全波整流。4 个二极管封装在一起时称作“二极管桥”。电流容量很大的二极管桥需要加装散热片，通常它会被螺钉固定在一个金属片上或安装在设备的底盘上，散热片使它能释放多余的热量。

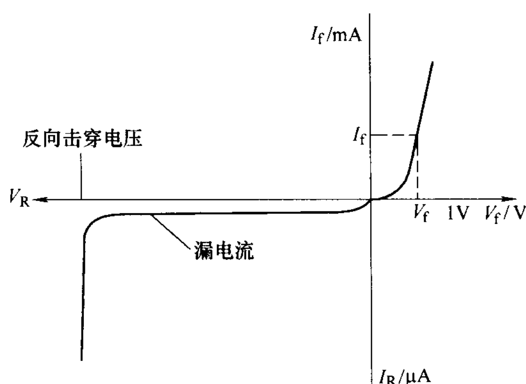


图 2-31　半导体二极管的电压电流性能

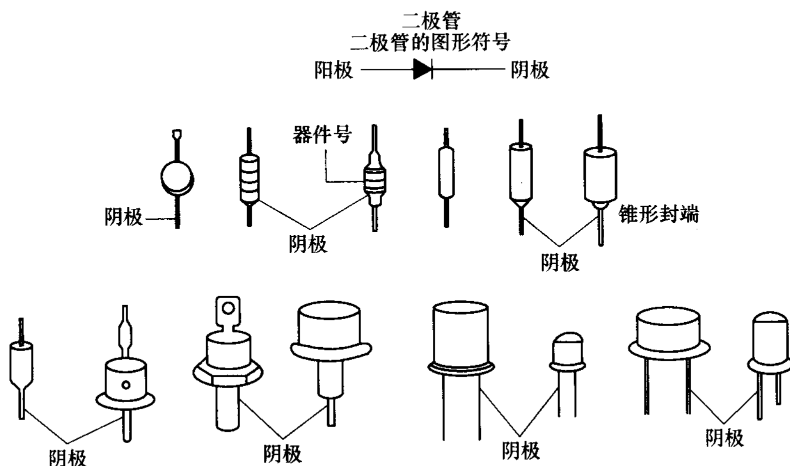


图 2-32　二极管的封装形式

2.10　几种特殊类型的二极管

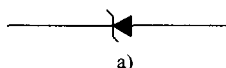
除了常用的半导体二极管，还有许多具有特殊性能的二极管。下面介绍几种特殊类型的二极管。

2.10.1　齐纳二极管

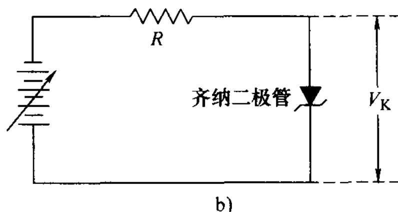
硅二极管的导通电流很低，25℃时只有 1μA。但是，在加有一定的反向电压时，它的反向电流会迅速增加。这个电压被称作雪崩电压或齐纳电压，它可能是 1V，也可能是几百伏特，这取决于二极管的结构。

在小于齐纳电压时，齐纳二极管呈现很大的电阻，这个电阻可达几兆欧。而达到齐纳电压时，齐纳二极管的电阻会突然下降，大约在 5 ~ 100Ω 之间。

齐纳二极管在齐纳工作状态下可用作电压源，因为那时它的电阻很低，通过齐纳二极管的电流只受串联电阻 R 的限制（见图 2-33）。串联电阻的阻值不能使齐纳二极管的功率超过额定功率。



a)



b)

图 2-33　齐纳二极管

a）电路符号　b）齐纳二极管用作电压源

为把齐纳二极管和普通二极管区分开来，前者通常会标明其击穿电压值。因为电路设计时需要这个电压值，所以二极管上一般都会标出。例如，常见的值有 6.8V、7.2V、9.6V 等。

2.10.2　变容二极管

变容二极管是一种硅二极管，在一定范围的反向电压内，它的电容值是可变的。变容二极管的电容标称值一般是 1 ~ 500pF，工作电压最大变化范围是 10 ~ 100V，它主要用于自动频率控制电路。举一个典型的例子，变容二极管在 5V 反向电压时电容是 10pF，30V 时是 5pF。图 2-34 为变容二极管的各种形状。

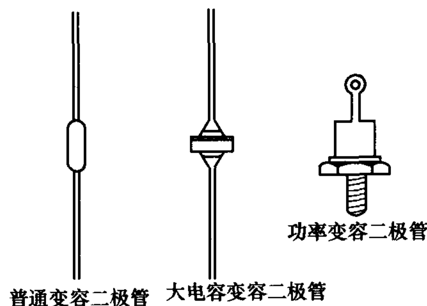


图 2-34　变容二极管的各种形状

2.10.3　压敏电阻器

压敏电阻器是一种半导体器件，它的电阻会随电压改变呈非线性变化，其阻值会随电压升高而降低。正向偏置的锗二极管就有这种特点，常用在压敏电阻器中，如偏置电压稳定电路。

对称压敏电阻器常用于仪表保护电路（见图 2-35），不论通过仪表的电流方向如何，二极管都可以将其旁路。如果仪表过载，压敏电阻器会阻止加于仪表

上的破坏性电压的增加。

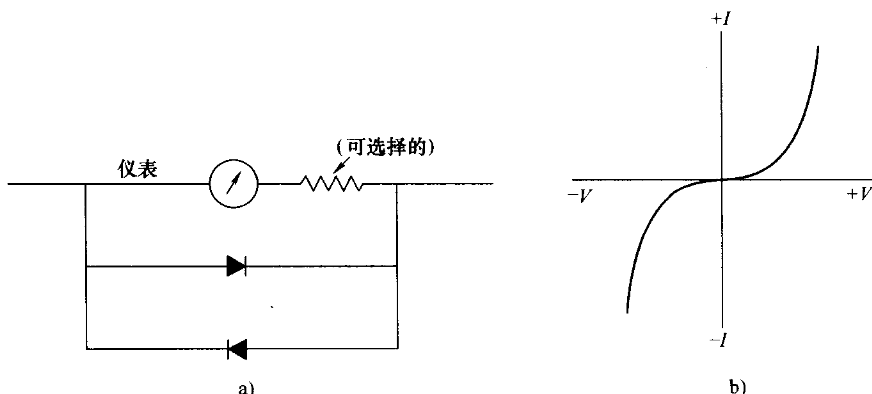


图 2-35　压敏电阻器用于仪表保护电路和压敏电阻器的电压/电流性能
a）压敏电阻器用于仪表保护电路　b）压敏电阻器的电压/电流性能

2.10.4　发光二极管

发光二极管（LED）主要是一个 PN 结，当正向偏压时会发光。发光二极管有许多形状（见图 2-36），并被安上了红色、黄色和绿色等各种颜色的玻璃膜。它主要用于七段显示器，这种显示器通过由独自供电的七个部分显示数字字符。

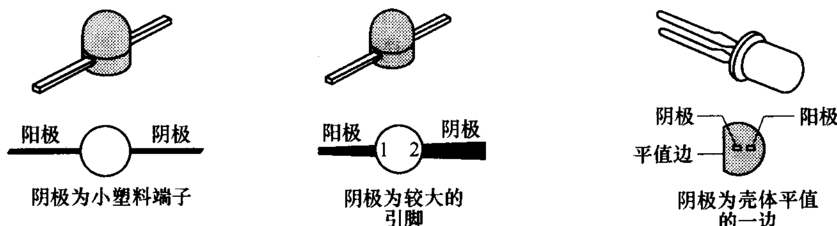


图 2-36　发光二极管

LED 显示器主要用于测试装置、计数器和数字温度计。LED 组可用于光源、穿孔磁带播放机、位置播放机等。

在电学原理方面，发光二极管与普通二极管相似，只是正向电压降更高。例如，其典型值是：深红为 1.2V，红为 1.85V，黄为 2V，绿为 2.15V。实际电压值会根据 LED 的制作工艺不同而有所变化。

2.10.5　光敏二极管

光敏二极管是固态元器件，与普通二极管相似，只是光敏二极管（PN 结）

受到光照时才开始起作用。当处在黑暗中时，它实际上是一个开路状态，而受到光照时就会产生很大的电流。

2.10.6 隧道二极管

隧道二极管（TD）就是一个 PN 结，它的电阻会随电压变化交替增大或减小。隧道二极管的电压/电流性能如图 2-37 所示。不同类型隧道二极管的电阻值变化范围为 1 ~ 200Ω。

隧道二极管可用于开关电路。开关电路有两个静态工作点，可以通过脉冲控制它从低电流静态工作点变化到高电流静态工作点。

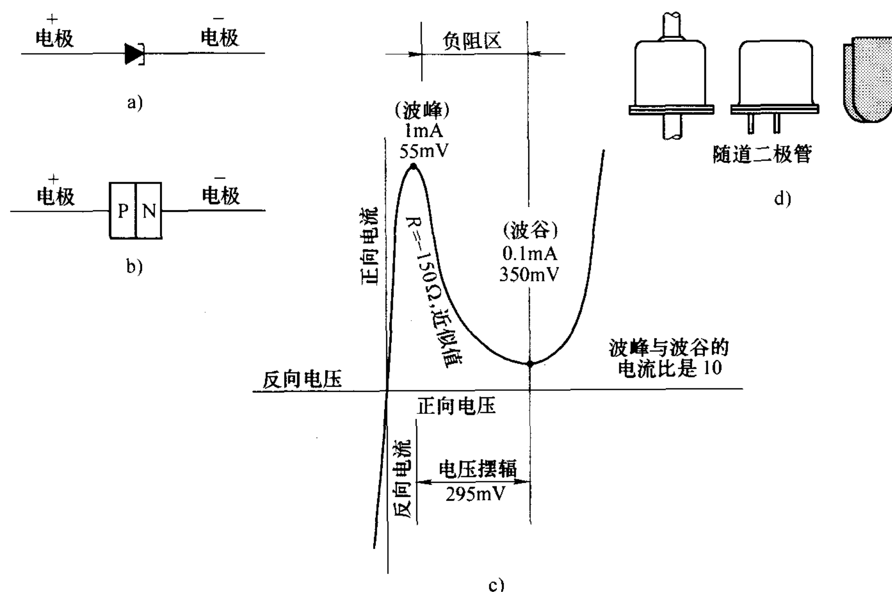


图 2-37 隧道二极管

a）符号 b）P 区和 N 区 c）电压/电流性能 d）封装形式

2.11 晶体管

2.11.1 双极型晶体管

最常用的半导体器件就是晶体管，它可以控制电路中电压和电流的增益。这使得晶体管在电路中具有放大、整流、检流、开关转换等几乎所有的常用功能。无论是作为单个器件还是作为集成电路中的器件，它都是所有固态电子学的基本器件。

晶体管是三端器件。三个端子分别被称作基极（B）、集电极（C）和发射极（E）。它由两个二极管组成的：一个基极-发射极二极管和一个基极-集电极二极管。在正常放大状态，基极-发射极二极管正向偏压，而基极-集电极二极管反向偏压。

所有晶体管中，反向偏压的基极-集电极二极管都会有漏电流通过。对于硅晶体管，这个电流为几纳安或更多，而在锗晶体管中，漏电流甚至达到了几微安。漏电流随温度升高而增加，每升高 10℃就会翻倍。

器件供应商的目录中列出了 500 多种封装的晶体管，然而，只有大约 100 种

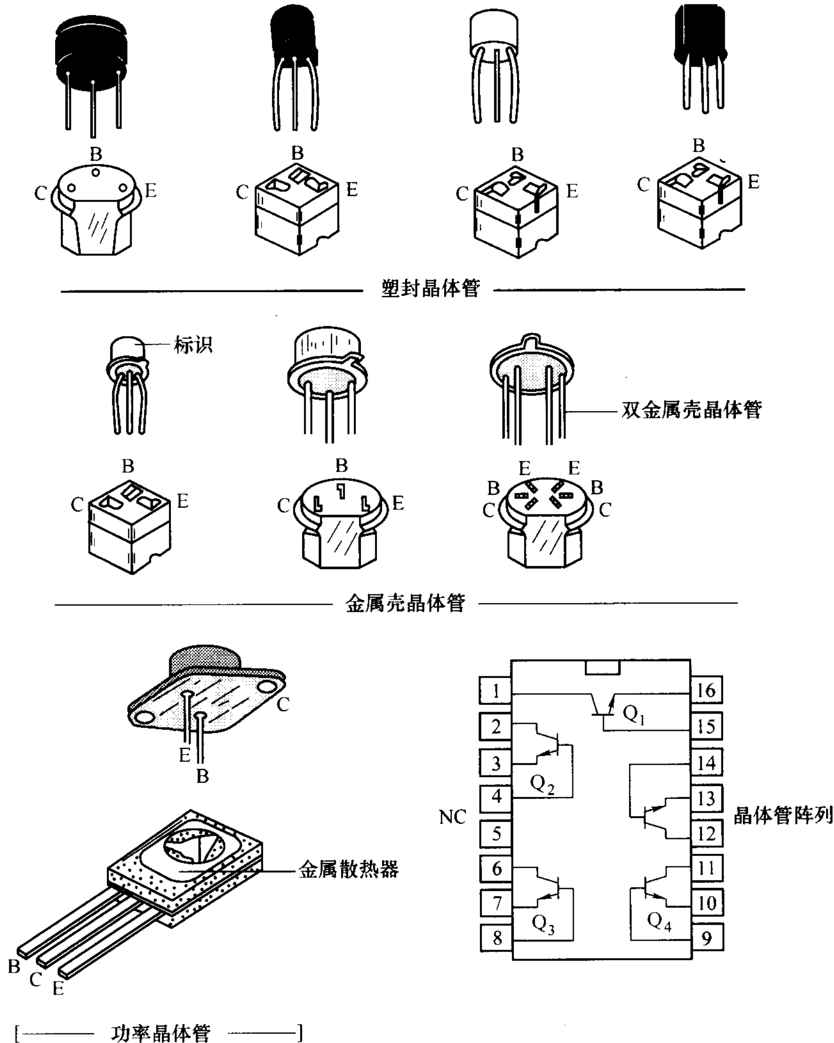


图 2-38　常用晶体管的封装及其端子

是比较常用的。金属壳晶体管（TO-3、TO-5 和 TO-18）已经应用了很长时间。但是，在中小功率的应用领域，更多的则是使用更便宜的塑料封装晶体管。在大功率应用领域，螺栓式和纽扣式的金属壳晶体管的使用仍比较普遍，扁平塑料封装的晶体管使用时需要安装金属片以便散热。图 2-38 所示为常用晶体管的封装及其端子。

图 2-39 所示为发射结所需的电压偏置极性。通过箭头可区分发射极和集电极，箭头所指的方向为“常规”电流的方向，电子流动的方向与箭头方向相反。该图中也比较了 NPN 和 PNP 晶体管导通和截止所需的偏压。如果晶体管的发射结是正向偏压，则晶体管导通，而如果晶体管的发射结是反向偏压，则晶体管截止。

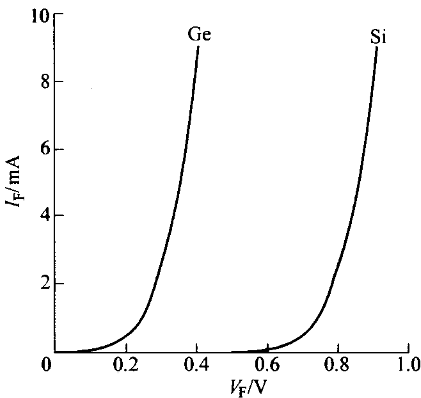


图 2-39　锗、硅晶体管发射结的正向电压性能

正向偏压发射结的电压降随晶体管的集电极电流而变化。例如，锗晶体管加上适当正向偏压，当集电极电流为 1 ~10mA 时，发射结电压为 0.2 ~0.3V，当集电极电流为 10 ~100mA 时，发射结电压为 0.4 ~0.5V。与之相比，硅晶体管的正向偏压大约是锗晶体管的两倍：当集电极电流较小时，发射结电压约为 0.5 ~0.6V，当集电极电流较大时，约为 0.8 ~0.9V。图 2-40 所示为锗和硅晶体管中发射结电压和电流的关系。

图 2-41 所示为晶体管的三种基本电路结构及其特点。通过测量基极和发射

类型	截止	导通
NPN 集电极 基极 发射极	+V 0V	+V 主电流 +V 控制电流
PNP 集电极 基极 发射极	−V 0V	−V −V 控制电流 主电流

图 2-40　晶体管的三种基本偏压

性能	共基极电路	共发射极电路	共集电极电路
输入阻抗	30～50Ω	300～1500Ω	20～500kΩ
输出阻抗	300～500kΩ	30～50kΩ	50～1000Ω
电压增益	500～1500	300～1000	<1
电流增益	<1	25～50	25～50
功率增益	20～30dB	25～40dB	10～20dB（射极跟随器）

图 2-41　晶体管的放大性能

极的压差就可以确定晶体管的状态，如果是正向偏压，则晶体管导通。

晶体管的一个常见问题是漏电流，它能够分流或改变偏压，影响电路的正常工作，在直接耦合或高频状态下这个问题更为严重。漏电流是指在结电压固定且第三端断开时，流过晶体管 PN 结的反向电流。例如，I_{CEO}是当集电极和发射极间电压固定且基极开路时，流过集电极-发射极的直流电流，这个电压要保证集电结是反偏压状态。如图 2-42 所示，在晶体管中有六种漏电路径存在（此时第三端是断开的）。

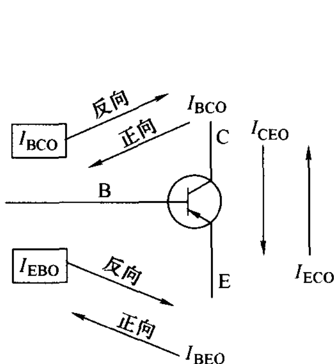


图 2-42　晶体管的漏电路径

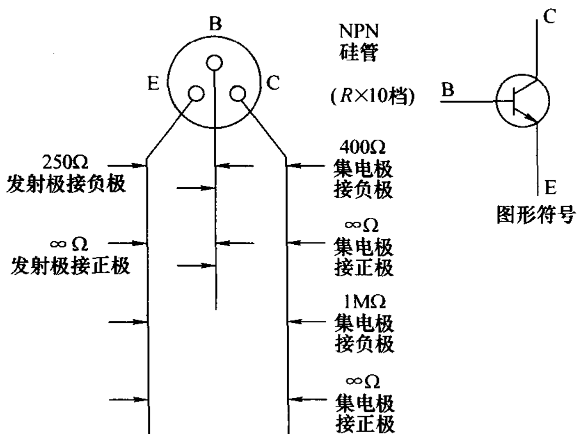


图 2-43　双极型晶体管结电阻值

图 2-43 为双极型晶体管结电阻的典型值。图中也标明了在晶体管不同引脚间电阻表的连接极性。

2.11.2 功率晶体管

与小信号晶体管相比，功率晶体管的 PN 结面积更大，并具有以下特点：

正向电阻值一般比小信号硅晶体管低，同样地，反向电阻值也较低。图 2-44所示为硅功率晶体管的结电阻值。

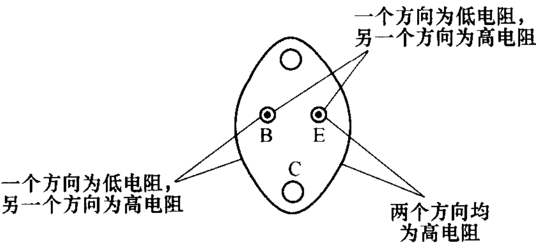


图 2-44 硅功率晶体管的结电阻值

功率晶体管一般都是装在散热片或散热板上（见图 2-45），有时还会被硅脂黏在设备底盘上以便散热。

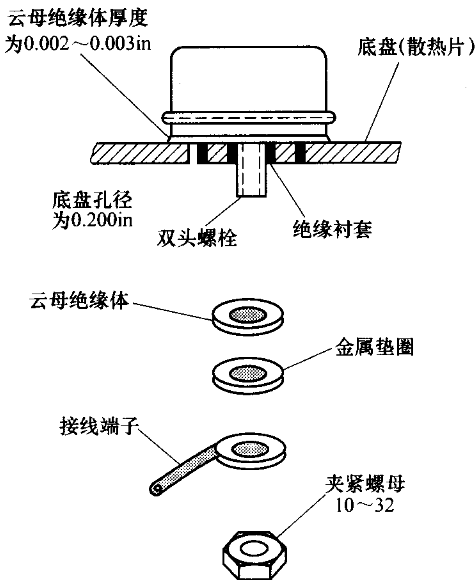


图 2-45 功率晶体管：安装步骤

2.11.3　达林顿晶体管

达林顿（Darlington）晶体管的结构很特殊，它由两个晶体管组成，这两个晶体管制在同一芯片上或至少装在同一个封装内。达林顿晶体管经常用于输入电路放大器中，以提供高输入阻抗。当驱动电流有限或需要较高增益（>1000）时，一般采用达林顿晶体管。如图 2-46 所示，两个晶体管的发射结是串联的，而集电极是并联的。达林顿管工作时，它的电流增益（h_{fe}）相当于构成它的两个晶体管电流增益的乘积，而发射结电压降相当于它们发射结电压降之和。

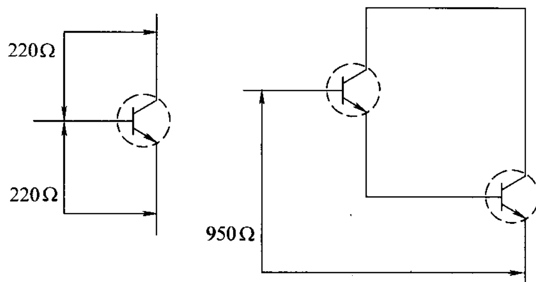


图 2-46　达林顿晶体管正偏压时的电阻值

2.11.4　场效应晶体管

场效应晶体管（FET）与双极型晶体管一样有三个端子，它们被称做源极、漏极和栅极（见图 2-47），分别相当于双极型晶体管的发射极、集电极和基极。源极和漏极引脚被接在同一个半导体材料（N 或 P 沟道）上，另一种掺有杂质的半导体材料则包围在沟道（在源极和漏极引脚之间）周围，并与栅极引脚相连。

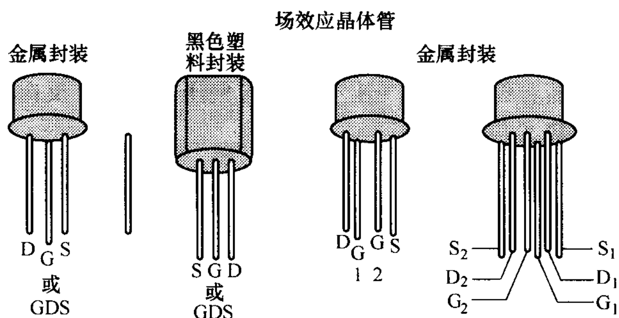


图 2-47　场效应晶体管的外形和端子

结型场效应晶体管正常工作时，栅源电压使得 PN 结反向偏置，从而产生出

一个电场，这个电场在源极-漏极沟道中产生出一个耗尽区。在这个耗尽区，载流子数量随反向偏压的增加而减少，使得源极-漏极电流起到栅源电压的作用。随着输入电流的反向偏压，场效应晶体管对信号源产生很高的阻抗。这与正向偏压的双极型晶体管基极-发射极间呈现低阻抗的情况正好相反。由于没有输入电流，场效应晶体管的噪声比双极型晶体管小。图 2-48 所示为 N 沟道和 P 沟道耗尽型场效应晶体管的电路图形符号和偏压情况。图 2-49 所示为场效应晶体管放大器的特点。

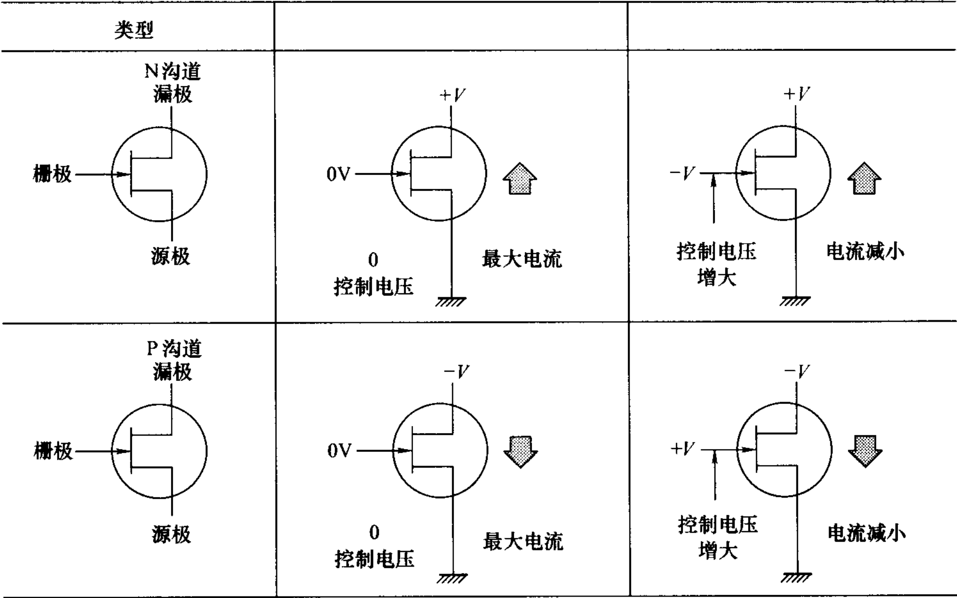


图 2-48 场效应晶体管偏压情况

相反地，大多数金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET），包括 CMOS 集成电路中的 MOSFET，都是“增强型”的器件。当栅极到源极为 0 偏压时，这些设备不工作，随着偏压增大（N 沟道正向偏压，P 沟道反向偏压），器件开始逐渐转换到工作状态。

场效应晶体管有三种类型：

1）结型；

2）绝缘栅型（耗尽型）；

3）绝缘栅型（增强型）。

每种类型都有 N 沟道型和 P 沟道型。

结型和耗尽型绝缘栅场效应晶体管像真空管一样处于“开启”状态，这两种器件不需要偏置电压就有沟道存在。与之相反，增强型绝缘栅极场效应晶体

性能	共源极	共漏极(源极跟随器)
输入阻抗	1～15MΩ	1～15MΩ
输出阻抗	5～100kΩ	11Ω～10kΩ
电压增益	10～200	1
功率增益	60～100dB	40～80dB

图 2-49　场效应晶体管放大器特点

管一般都是“关断”状态，必须在偏置电压作用下才会有沟道产生。

图 2-50 所示为一结型场效应晶体管的结电阻值。正向和反向电阻只出现在栅极和源极间或栅极和漏极间。源极和漏极间的电阻大小与电阻表的极性无关。

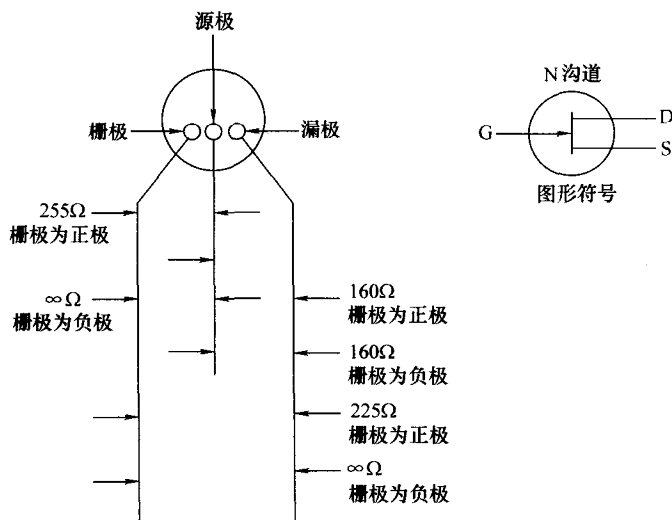


图 2-50　结型场效应晶体管的结电阻值

需要记住的是，栅源极和栅漏极间的结电阻都是非线性的，其电阻值根据所使用的范围不同而变化。

结型场效应晶体管在电路上装卸时无需特别注意，只需防止焊接或融化焊接时引起电路过热。而绝缘栅场效应晶体管的绝缘体是在栅极和沟道之间，相当于一个精密的电容。绝缘体很薄，栅极又小，很容易受损（见图2-51）。当栅极引脚开路时，要特别当心荧光灯噪声所产生的静电干扰。这种情况可能发生在场效应晶体管安装之前或当它从绝缘盒上拆下来，短路线剥开后放在桌子上的时候（短路线就是缠在所有引脚上的一小节金属线）。

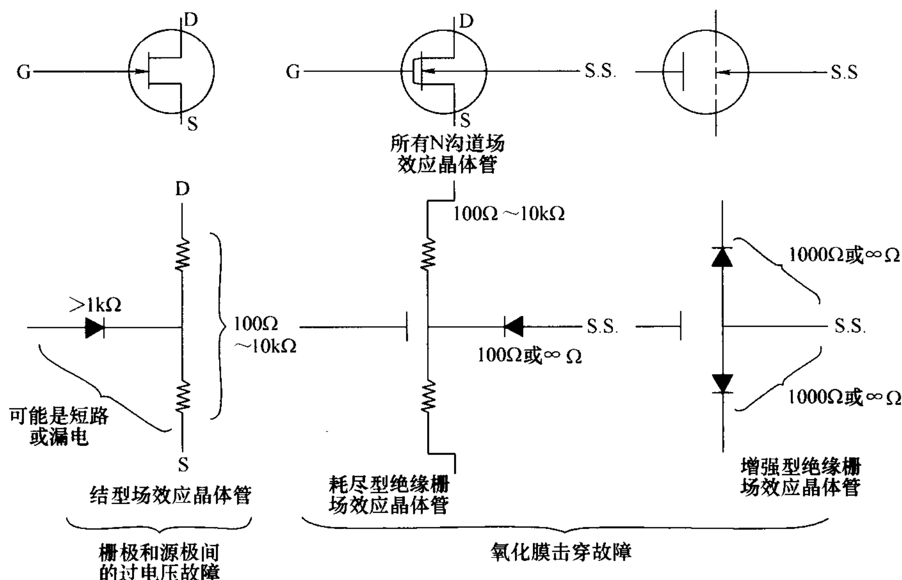


图2-51　场效应晶体管的故障

2.11.5　绝缘栅双极型晶体管

在绝缘栅双极型晶体管（IGBT）开发出之前，需要快速开关的中低电压应用领域使用的是MOSFET，而在需要大电流传导的高电压应用领域使用的则是晶闸管和双极型功率管。MOSFET具有简单的栅极控制电路，并且快速开关能力很强。但是，它的缺点是，在200V或更高电压下，它的电阻会随着击穿电压上升而急速增加。双极型功率晶体管由于正向电压降低而有着很强的电流导通功能，但它的基本控制电路很复杂，并且其快速开关能力与MOSFET相比有很大差距。绝缘栅双极型晶体管拥有以上两种器件的优点。

绝缘栅双极型晶体管的结构综合了MOSFET和双极型功率晶体管的特点

（见图 2-52）。输入端是一个 MOS 栅极结构，而输出端则是一个广泛适用的 PNP 晶体管，PNP 晶体管的基极驱动电流是由输入电路提供的。除了 PNP 晶体管，还有一个 NPN 晶体管，它是用来防止由 MOSFET 源金属引起的基极和发射极间的短路的。由 PNP 晶体管和 NPN 晶体管组成的四层 PNPN 形成了一个晶闸管结构，不像功率 MOSFET 那样，它没有一个寄生的积分反向二极管，因此它需要连接一个合适的快速恢复二极管以备用。

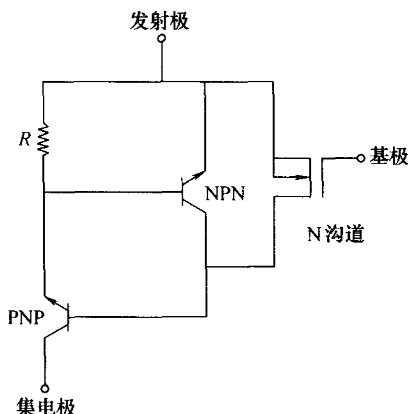


图 2-52　绝缘栅双极型晶体管（IGBT）的结构

2.11.6　晶体管类型标注

这些年来，制造商已经发布了大约 50000～100000 种晶体管型号。然而大多数已不再应用了，以下是一些常用晶体管的类型。

1. 联合电子器件工程委员会（JEDEC）

晶体管类型按照以下形式标注：

阿拉伯数字，字母，序号，（后缀）

字母一般是“N”，序号为 100～9999，只是表示晶体管的大概生产时间。后缀表示器件的增益（h_{fe}）分类情况。例如：

A = 增益较低　B = 增益中等

C = 增益较高　无后缀 = 没有分类（任意增益）

例如：2N904，2N3819，2N2221A

实际的增益及其分组会在数据表单上给出。增益分类的原因是低增益器件比高增益器件便宜，这样大批量购买的用户就可节省资金。

2. 日本工业标准（JIS）

它的标注形式如下：

数字，两个字母，序号，（后缀）

字符表示其应用范围，由代码的形式给出：

SA = PNP HF 晶体管　SB = PNP AF 晶体管

SC = NPN HF 晶体管　SD = NPN AF 晶体管

SJ = P 沟道 FET/MOSFET　SK = N 沟道 FET/MOSFET

序号为 10～9999。

后缀表示此类型由不同的日本机构核准使用。由于晶体管的代码经常由 2S 开头，所以有时会把 2S 省略。例如，2SC733 会被标注为 C733。JIS 标注晶体管的典型例子有：2SA1187、2SB646、2SC733。

3. 先进电子系统

这个欧洲系统采用以下形式：

两个字母，(字母)，序号，(后缀)

第 1 个字母表示制作材料：

A = 锗　B = 硅　C = 砷化镓　R = 混合材料

大多数晶体管材料采用硅，所以用 B 开头。第 2 个字母表示器件应用范围：

C = 晶体管，AF，小信号管　D = 晶体管，AF，功率管

F = 晶体管，HF，小信号管　L = 晶体管，HF，功率管

U = 晶体管，功率，开关管

第 3 个字母表示器件适于工业或专业使用，而不是商业用途。常用 W、X、Y 或 Z 表示。序号为 100 ~ 9999。后缀表示增益类别，类似于 JEDEC。

例如：BC108A，BAW68，BF239，BFY51

4. 旧标准

一些老的标准用 OC 或 OD 加上两三个数字（例如 OC28）或 CV 标注（英国）(如 CV7)。现在的晶体管已不采用这种标注。

5. 制造商的标注

除了以上标注方法，出于商业原因或为了强调器件的特殊应用范围，制造商也会介绍其自己的产品类型。一些常见品牌的前缀为：

TIS = 德州仪器，小信号晶体管（塑料封装）；

TIP = 德州仪器，功率管（塑料封装）；

MPS = 摩托罗拉，小功率管（塑料封装）；

MRF = 摩托罗拉，HF、VHF 和微波管；

RCA = 美国无线电公司。

2.12 晶闸管

晶闸管是与闸流管电气性能相似的固态器件的总称。这类器件主要应用于固态功率控制和开关电路，从而代替了旧的延时电路。以下三种型号的晶闸管应用较广泛：

硅可控整流器（反向阻断三极晶闸管）；

双向三极晶闸管；

四端晶闸管（双向开关）。

晶闸管广泛应用于功率控制电路。它特别适用于交流功率控制，例如，照明调光器、电动机速度控制器、温度控制器和直交流转换器。它也可用于直流电源的过电压保护。

晶闸管是一个四层 PNPN 结构的器件（见图 2-53），它可以被双晶体管组合结构等效，两个晶体管交叉连接：一个是 PNP 管；另一个是 NPN 管。NPN 管的基极与 PNP 管的集电极相连，而 PNP 管的基极与 NPN 管的集电极相连。晶闸管一般是闭合的，但当门控开关加以触发脉冲时，晶闸管就从不导通状态转为低

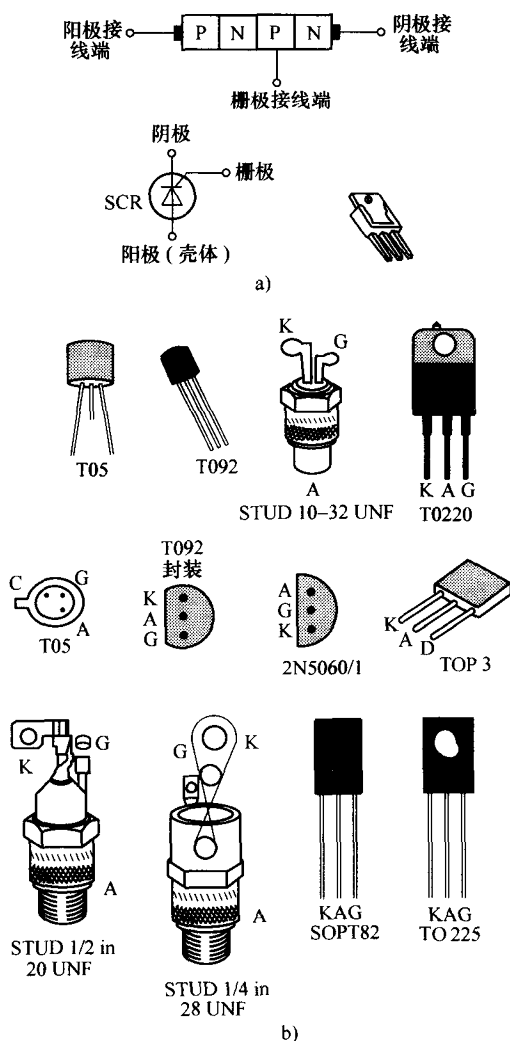


图 2-53　硅可控整流器的结构图形符号和封装形式

a）硅控整流器的结构和符号　b）硅控整流器的封装形式

电阻正向导通状态。一旦被触发导通，晶闸管就会一直保持这个状态，直到电流低于维持电流值或施加反向偏压为止。这就是说，晶闸管有很强的非线性电压电流性能（见图 2-54）。

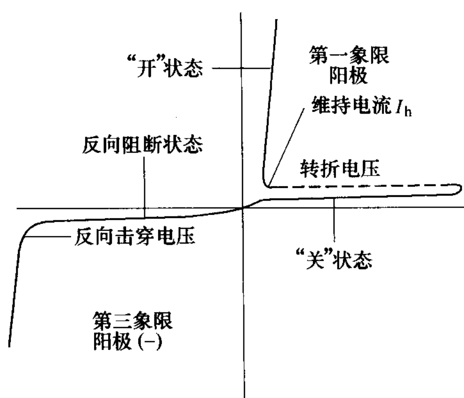


图 2-54 晶闸管的电压电流性能

在电动机速度控制器或照明调光器中，晶闸管被触发到交流功率原点的具体时间决定了其功率的大小。在一个周期中较早触发晶闸管，将会给负载提供较高的功率，晚触发只会提供较小的功率。与简单的可变电阻器相比，晶闸管的优势在于在完全工作状态和完全关闭状态下，它的功率耗散很小。

双向三极晶闸管的工作特点类似于两个晶闸管反向并联（它们有公共的门极），这就是说该器件可以在正反两个方向通过或阻止电流。很明显，只要有适当的门极信号，晶闸管就可以在任意方向上被触发导通。

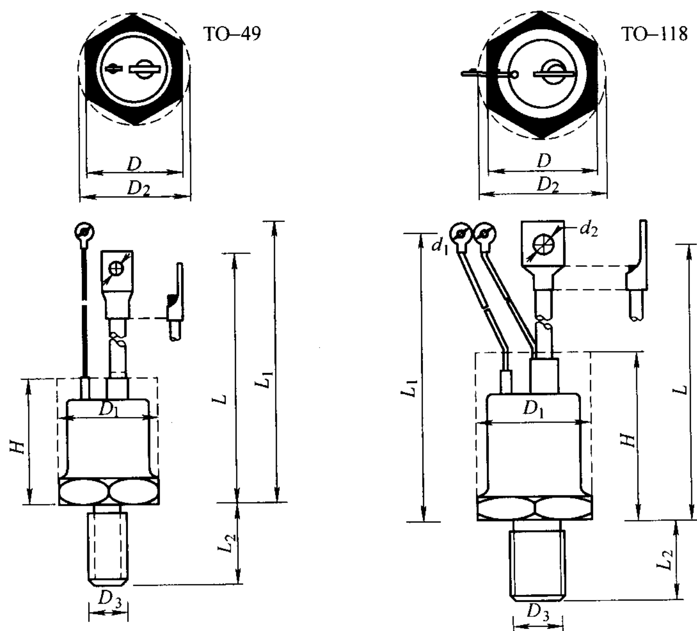


图 2-55 带可变端子的 SCR 和 TRIAC 的典型螺栓形封装

许多晶体管的封装形式都可被用于封装硅可控整流器（SCR）和双向三极晶闸管（TRIAC）。此外，也有许多其他特殊的封装形式，常见的有 TO-49、TO-118、TO-65 和 TO-200，如图 2-55 所示。

2.13 集成电路

集成电路是将晶体管、电容、电阻和电路其他部分封装在同一块芯片上，它的功能与由分立元器件组成的电路相似，由于组件的体积较小，因此能高密度组装到一片硅基片上。集成电路的种类和封装有很多，但功能不同，集成电路封装的引脚数也不同。集成电路可直接焊接在印制电路板上，然而，一些设计者更喜欢用集成电路插座，因为当集成电路出了故障时，很容易更换。广义上讲，有两种集成电路：线性集成电路和数字集成电路。

2.14 线性集成电路

线性集成电路信号的输出与输入成一定比例。有许多种类的线性集成电路：运算放大器；差动放大器；仪器放大器；音频视频放大器；宽带放大器；射频放大器；电压/电流调节器；模拟/数字（A/D）和数字/模拟（D/A）转换器。绝大多数放大器都能封装在一个电路中，等同于许多分立元器件的集合。

线性集成电路的一个重要类型是运算放大器。这种放大器原本用于模拟计算机中加减乘除等各种数学运算，现在则用于各种精确的电路功能。有超过 2500 种的商用运算放大器，其中大多数是小功率器件，其功率消耗可达 1W，根据其电压增益、温度范围、噪声大小和其他特点会有所不同。

2.14.1 运算放大器

运算放大器是一种完整的放大器电路，它可以制成一个单硅片集成电路。它将很多晶体管和其他组件封装为一个独立的功能单元，它对信号输入有很好的调节作用。其特点是有极高的直流（稳态）和低频增益，很高的输入阻抗，很低的闭环输出阻抗，频率变化时较稳定的增益变换。运算放大器的线性转降性能使它的应用很广泛，并且能从多种反馈网络中得到反馈信号，从而保持很高的动态稳定性。运算放大器的具体应用明显是由器件和其外部电路连接决定的。

1. 电路图形符号

运算放大器的电路图形符号是一个三角形（见图 2-56）。在数字电路图形符号中，反向器也用三角形表示，但运算放大器的符号要更大一些。三角表示信

号流的方向，它与三条水平线相连，其中两条（A 和 B）表示信号输入，而第三条（C）则表示信号输出。

信号输入端在三角形里面分别用负号（-）和正号（+）表示。负号表示反相输入，因为输出电压相位与这个输入电压相位差为 180°；正号则表示同相输入，输出电压相位与该端输入电压相同。“反相”和“同相”就是用来表示输出电压与输入电压相位的关系。图 2-57 所示为运算放大器作为反相和同相放大器的工作性能。

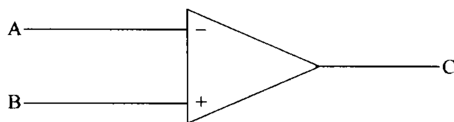


图 2-56 运算放大器的电路图形符号

运算放大器既有金属封装，又有双列直插环氧封装形式，两种封装形式都有其相应的插座。尽管集成电路可以直接焊接在印制电路板上，但大多数情况下还是使用插座安装。图 2-58 所示为集成电路及其插座的引脚编号方式。

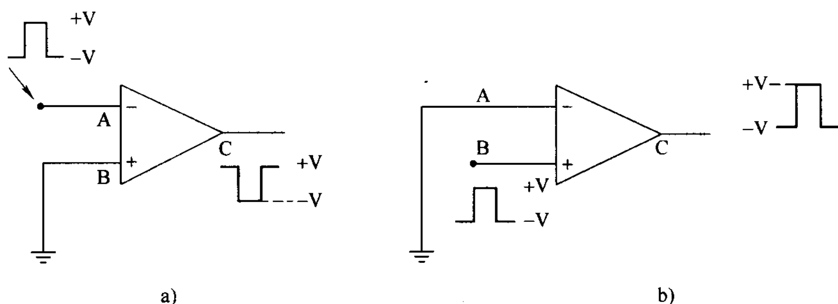


图 2-57 运算放大器的反相输入和同相输入
a）运算放大器反相输入 b）运算放大器同相输入

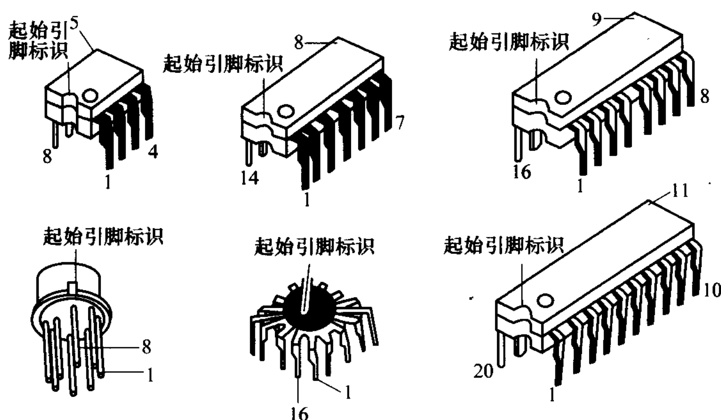


图 2-58 线性集成电路的常用封装形式

2. 运算放大器的标注

一般来讲，运算放大器表面上有三类信息（见图 2-59）：图中 μA741 为器件类型，T 为封装形式，C 为温度范围。

(1) 器件类型

这组文字和数字表明了器件的功能和电气性能。

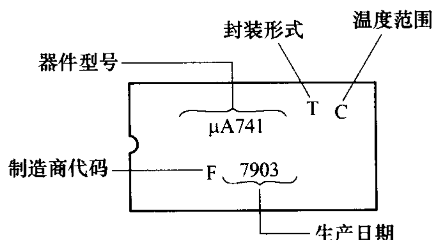


图 2-59　运算放大器的标注

(2) 封装形式

用一个字母表示基本的封装类型。不同的字母含义不同：

D = 双列直插式封装（密封，陶瓷封装）；

F = 扁平封装；

H = 金属罐状封装；

J = 金属功率封装（TO-66 外形）；

K = 金属功率封装（TO-3 外形）；

P = 双列直插式封装（模制）；

R = 小型双列直插式封装（密封，陶瓷封装）；

T = 小型双列直插式封装（模制）；

U = 功率封装（模制，TO-220 外形）。

(3) 温度范围

三种主要的温度范围为：

C = 商用　　0 ~ 70℃

M = 军用　　-55 ~ 125℃

　　　　　　-55 ~ 85℃

V = 工业用　-20 ~ 85℃

　　　　　　-40 ~ 85℃

例如：

1) μA710FM：这个标注表示一个扁平封装适于军用温度范围的 μA710 电压比较器。

2) μA725HC：这个标注表示一个金属罐状封装适于商用温度范围的 μA725 仪器运算放大器。

此外，器件表面也会标注出制造年份、批号和制造商。

3. 运算放大器的电源要求

像其他晶体管放大器一样，运算放大器也需要用直流电源。电源要有适当的电压校准和滤波功能，以使运算放大器正常工作。

运算放大器的电源引线处会以地为参考点标注出 + *V* 和 - *V*，以便正负电源电压与运算放大器正确连接。正负电源电压一般是对称的，例如，两种电压数值相同，只是方向相反。运算放大器的最常用电源电压为 +15V 和 -15V，但也不都是这样，因此，最好查看制造商提供的运算放大器数据单来确定其电源要求。

在电路图中，运算放大器的电源引线有时并不标出，这是因为它认为读者已知道运算放大器必须连接直流电源。

2.14.2 三端稳压器

三端稳压器是具有三个端子的集成电路，输入信号接在中间引脚和输入端之间，而输出信号则接在中间引脚和输出端之间。常见的固定电压有 5V、9V、12V 等。绝大多数的现代设备都使用这种稳压器。

一种典型的 +5V 三端稳压器就是 78L05，这种稳压器的形状和大小与 2SC1815 晶体管很相似。如图 2-60 所示，7805 也是一种 +5V 的三端稳压器，但根据其所用散热器不同，其电流容量为 500mA ~ 1A 不等。这两种 7805 型稳压器的输入电压均为 +35V。三端稳压器的输出电压有很多种：5V、6V、8V、9V、10V、12V、15V 和 18V。

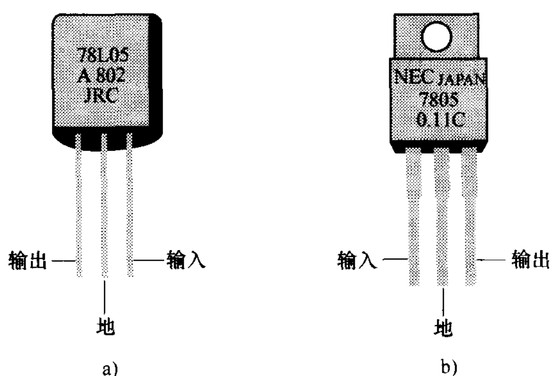


图 2-60　78L05 和 7805 三端稳压器
a) 三端稳压器 78L05　b) 三端稳压器 7805

对于不同种类的稳压器，引脚必须在数据单中明确标出。

2.15 数字集成电路

数字集成电路在电子领域应用广泛，涉及到计算、工业控制、电子仪器、通信系统和医疗设备等。事实上，看不出有哪个电子领域现在或将来都不会在

某种程度上用到数字集成电路，其主要原因是数字集成电路有固定的工作电平，这大大减小了输出结果和电路运行状态的不确定性。许多电路的工作电压只有“开”和“关”状态，例如，灯只有“开”或“关”状态，电动机只是运行或停止，电子管只能是“打开”或“关闭”，所有这些电路都是“数字”信号，都需要数字电路器件来操作和控制。

数字电路应用范围很广，从大电流工业电动机到微处理器。然而，所有数字电路的基本器件都是由逻辑门对其输入信号进行逻辑运算的。

2.15.1 逻辑电路

逻辑电路是电子电路中起决定作用的单元，它是控制数据流和标准信号处理的电路基本组成部分。在绝大多数逻辑系统中，输出是由高电平或低电平来表示的。

有许多方法可表示结论“是”或“否”的状态。以下是一些例子

是	否
打开	关闭
1	0
正	负
真	假
高	低
ON	OFF

2.15.1.1 逻辑习惯

在数字电路中，0和1代表两种不同的电平，常被称为低电平和高电平。用来表示这两种电平的逻辑习惯如下（见图2-61）：

在正逻辑习惯中，逻辑1代表正电平（高电平），而0代表负电平（低电平）；在负逻辑习惯中，逻辑1代表负电平（低电平），而0代表正电平（高电

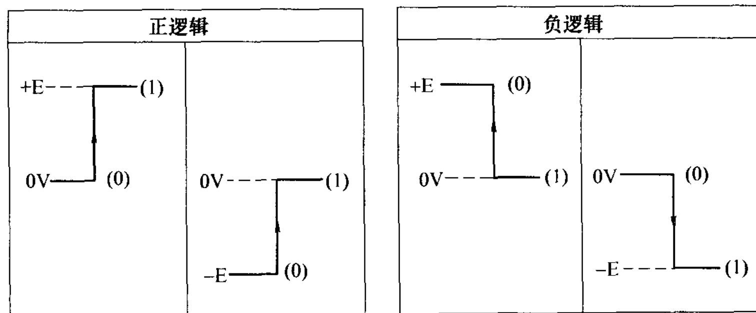


图2-61　数字电路中用来表示高低两个电平的常用逻辑习惯

平）。

理解这种数字电平的表示习惯很重要。例如，假设数据1001（二进制）是代表对十进制数输出的一组二进制编码，在正逻辑中，表示1001（二进制）=9（十进制），而在负逻辑中，则表示0110（二进制）=6（十进制）。

门电路是数字电路中的基本逻辑单元，它能进行布尔代数运算。最常见的门电路有与、与非、或、或非、非等。集成电路中门电路的数量决定于封装的引脚数。例如，14引脚封装的集成门电路可以包含四输入与非门，或者三输入与非门，或者四个两输入与非门。

2.15.1.2 逻辑电路分类

基本逻辑部件的性质决定于制作其选用的材料。数字技术初期，电路中普遍使用二极管，与门和或门自然是基本器件。后来，晶体管的应用使与非门和或非门成了基本器件，这是因为晶体管的信号输出与其输入正好相反。现在数字设备中最常见和最广泛应用的电路是晶体管-晶体管逻辑电路和金属氧化物半导体逻辑电路。现在的逻辑电路已经变得很复杂了。集成电路的发展已经解决了体积的问题，并能使一片集成电路完成多项功能。可以注意到，任何集成门电路的逻辑功能都与其制作工艺无关。

晶体管-晶体管逻辑（TTL）：TTL电路应用最为广泛，绝大多数的半导体制造商都把逻辑门电路制作成了集成电路。TTL电路的基本器件是双极型晶体管，TTL技术采用多发射极晶体管作为输入电路，采用推挽式输出电路。另一种输出电路是集电极开路输出电路，这种电路需要一个外部上拉电阻以得到适当的高电平和低电平输出。

TTL的广泛应用得益于其极强的扇入扇出功能、极快的速度（特别是肖特基型TTL）、与其他数字电路的易连性和较低的能耗。TTL逻辑电路的主要特点是：传导延迟为10ns，触发速率为20MHz，扇出（可从输出设备输入信号的电路数量）为10，噪声容限为0.4V，每门耗散功率为10mW。标准TTL门为74系列，它的最高工作温度可达70℃。然而54系列的最高工作温度可达125℃。绝大多数的集成电路不止包含一个门电路，例如，IC7400包含四个两输入与非门，而7420包含两个四输入与非门。TTL门电路有多种类型，绝大多数只是速度和功率耗散不同，其具体类型如下：

肖特基TTL电路：它的速度比标准TTL快，功率耗散也低。肖特基TTL集成逻辑门电路常表示为74S/54S系列。低功率肖特基TTL系列表示为54LS/74LS。

发射极耦合逻辑（ECL）电路：ECL电路采用另一种方法来提高门电路的速度。它与其他类型逻辑电路完全不同，当晶体管导通时，处于不饱和状态，逻辑电路振幅不断减小。例如，假如ECL门电路从5V开始工作，逻辑0为

0.9V，逻辑1为1.75V。

互补金属氧化物半导体（CMOS）逻辑电路：CMOS逻辑电路的性能明显优于双极型晶体管逻辑电路，特别是它的功率耗散很低，并且抗干扰性很强。

CMOS技术的巨大优越性使得大量器件进行高密度集成成为可能。这项技术更适合于制作大规模集成电路，而不适用于简单的门电路和触发器。商用CMOS集成门电路为4000系列。例如，CMOS 4081（7408 TTL）中包含四个两输入与门，而CMOS 4001（7402 TTL）中包含四个两输入或非门。

CMOS数字集成电路：采用逻辑电路的现代电子设备，通常使用CMOS电路。CMOS表示互补金属氧化物半导体，有时也写成COS/MOS。

从外部来看，CMOS门电路的基本运算与常规双极形TTL门电路的反相器、触发器、与非门、与门、或门、或非门等相同。图2-62所示为TTL和CMOS反相器的结构。典型的TTL电路是由晶体管和寄存器组成的，然而CMOS完全由半导体材料制作，因此构造简单，功耗更低。CMOS反相器由一个N沟道和一个P沟道MOSFET组成，如图2-62所示。其工作原理如下：

1）N沟道MOSFET，可被正栅极电压开启；

2）P沟道MOSFET，可被负栅极电压开启。

"ON"状态时源极-漏极电阻的典型值为1000Ω，而"OFF"状态时源极-漏

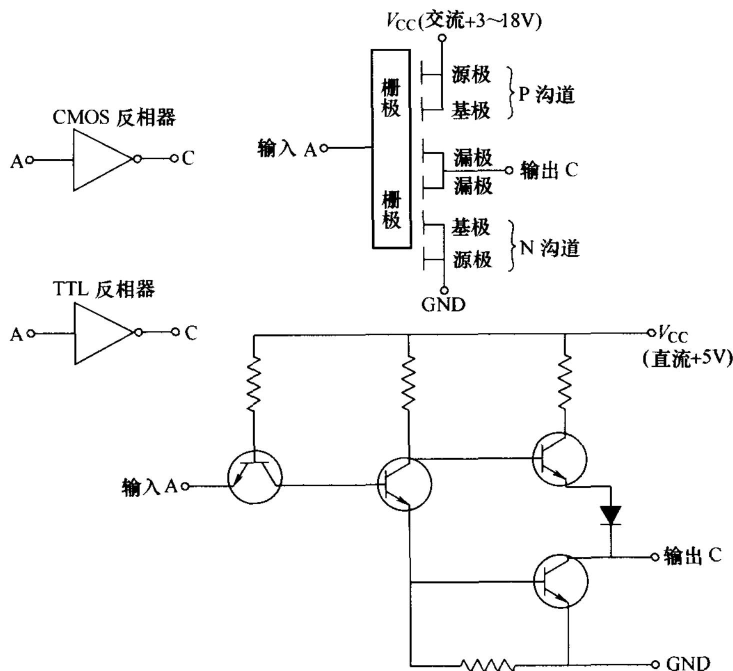


图2-62　TTL和CMOS反相器的结构

极电阻为10000MΩ。

在输入端加+12V（逻辑1）电压，可使N沟道MOSFET变为“ON”状态，P沟道MOSFET变为“OFF”状态，最终输出端基本为地电平或逻辑0电平。相反地，如果在输入端加上地电平（逻辑0电平），可使P沟道MOSFET变为“ON”状态，N沟道MOSFET变为“OFF”状态，转换结束时输出端电压为V_{DD}或12V，或是逻辑1电平。

2.15.1.3 按封装密度的集成电路分类

SSI（小规模集成电路）是指集成度为每个芯片有12个等效门。它们为14或16个引脚DIP或扁平封装。

MSI（中规模集成电路）集成度的典型值为每个芯片有12～100个等效门。它们为24个引脚DIP或扁平封装，或28个引脚陶瓷封装。

LSI（大规模集成电路）集成度的典型值为每个芯片达1000个等效门。它包括存储器或一些微处理器电路。

VLSI（超大规模集成电路）的集成度极高，每个芯片含有多达100000个等效门。例如，一片随机存储器中在一个芯片中含有4000多个等效门，这就是为什么它属于超大规模集成电路的原因。

2.15.1.4 逻辑集成电路系列

常用逻辑集成电路系列如下：

1）标准TTL型（74/54型）；

2）CMOS型（4000B型）；

3）低功耗TTL型（74L/75L型）；

4）肖特基TTL型（74S/54S型）；

5）低功耗肖特基TTL型（74LS/54LS型）；

6）ECL型（10000型）。

2.15.1.5 数字集成电路封装类型

数字集成电路有多种封装类型。图2-63所示为其中一部分，具体如下：

双列直插封装（DIP）：SSI、MSI和LSI中，绝大多数TTL和MOS器件的封装类型是14、16、24或40引脚的DIP。

小型双列直插封装（mini DIP）：小型DIP通常是8引脚封装。

扁平封装：扁平封装通常用于需要轻便型集成电路的设备，它常用于军事和太空领域。扁平封装集成电路的引脚数各异。

TO-5、TO-8金属罐状封装：TO-5、TO-8罐装封装集成电路的引脚数为2～12。

以上所有封装类型集成电路各有其引脚编号的规定。为了了解某种封装器件引脚的具体编号，制造商必须在封装类型数据单上标明，用户也必须以此为

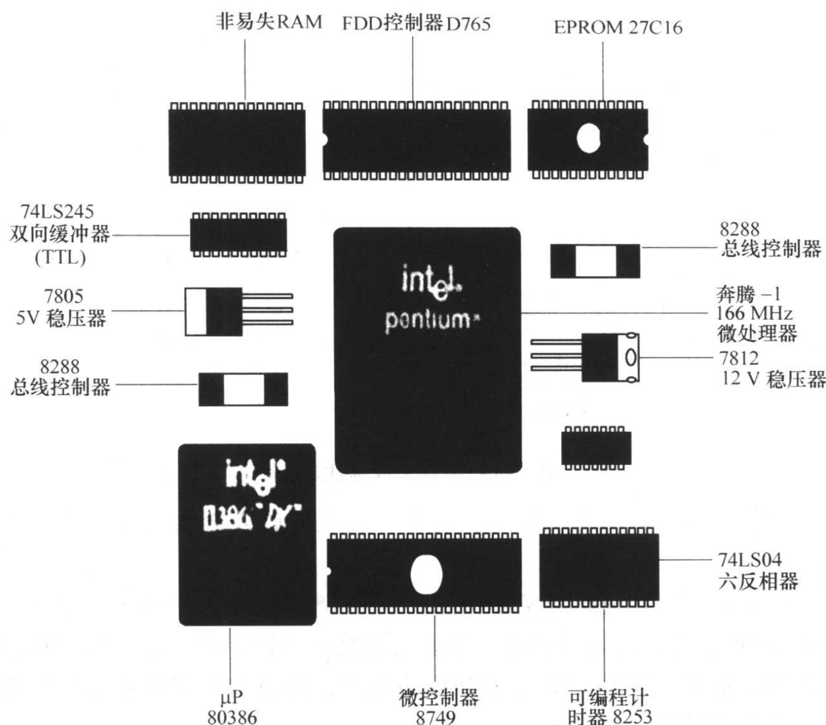


图 2-63　数字集成电路的典型封装类型

参考。

2.15.1.6　集成电路的区分

数字集成电路通常是 DIP，而 DIP 的器件有时是模拟器件——比如运算放大器或抽头式电阻器。因此，懂得怎样区分集成电路类型是很重要的。

在原理图中，集成电路用以下两种方法表示：

1）集成电路用矩形表示，其中的每个引脚都标出了引脚号，集成电路的型号在原理图中标明（见图 2-64）。

2）集成电路用它的简单逻辑部件表示。例如，IC 74LS08 包含四个两输入与门。在原理图中，它被标注为 1/4 74LS08（见图 2-65）。

集成电路可根据其自身提供的信息进行区分。标注方法虽然已经标准化，但还

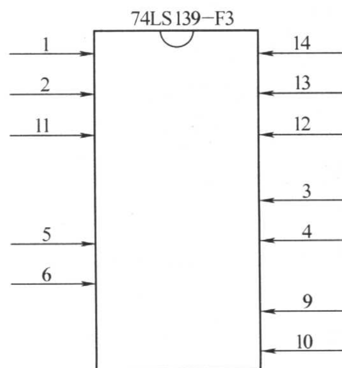


图 2-64　数字集成电路原理图表示法

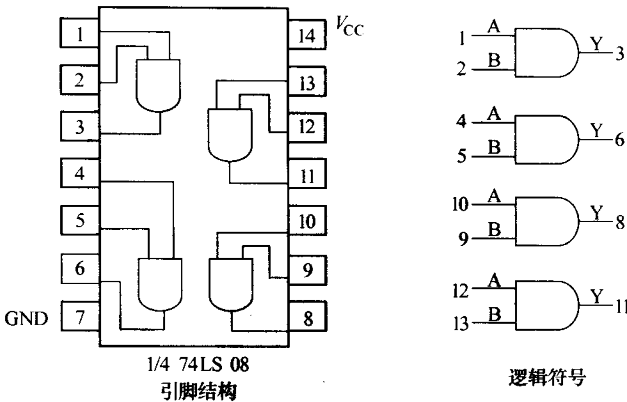


图 2-65 按照逻辑组成标注集成电路

是会根据制造商的不同而有所区别。通常，集成电路表面会有这样的标注（见图 2-66）。

核心数字：表明其逻辑类型和功能。以 74LS51 为例，前两个数字表示集成电路属于 7400 系列，最后的字母表示集成电路的功能，在中心字符中间的字符表示其所属子系列。因为 TTL 是最常用的类型，所以中心字符数字中间没有字母。其他类型用以下字母表示：

C = CMOS；

L = 低功耗；

LS = 低功耗肖特基；

S = 肖特基；

H = 高速。

每一类别中核心数字相同的集成电路，其功能和引脚数也相同。但它们不能互换使用，因为其延时和功耗要求不同。

核心数字的前缀表示制造商。例如，SN 表示该器件由 TI 公司制造。核心数字的后缀表示封装类型、温度范围等。

有些集成电路上也标出了它的制造年份和生产批号。例如，9834 表示该器件产于 1998 年第 34 批。

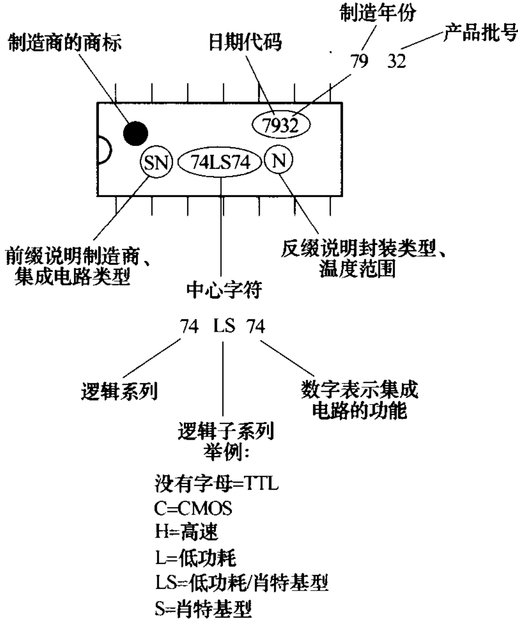


图 2-66 数字集成电路信息的标注

制造商的商标和集成电路的其他信息一样也会印在集成电路上。关于集成电路更加详细的信息可以从以下两种方法中获得：

1）绝大多数集成电路制造商会发行数据手册和生产信息数据单。对于大多数常见系列，如 7400 型，能从许多途径得到其详细信息，如引脚图和真值表等。

2）定期出版的《IC 大师》可以作为一本很好的参考书，这种出版物在较好的技术类图书馆里都可以找到。

2.15.1.7　集成电路引脚图

数字集成电路主要有以下三种封装类型：

金属封装 TO 型：这种封装的集成电路，所有引脚排成一个圆圈，并且从底部观看是按顺时针方向排序。最靠近方向标志的引脚标号最大。最常见的金属封装类型是 TO-73（12 个引脚）、TO-99（8 个引脚）和 TO-101（12 个引脚）。

双列直插封装（DIL 或 DIP）：它的所有引脚排成两排。常见的类型是 T-116，有 14 个引脚；另一种常见类型是 16 个引脚的 DIP，它与先前提到的 14 个引脚的类型大小相同。

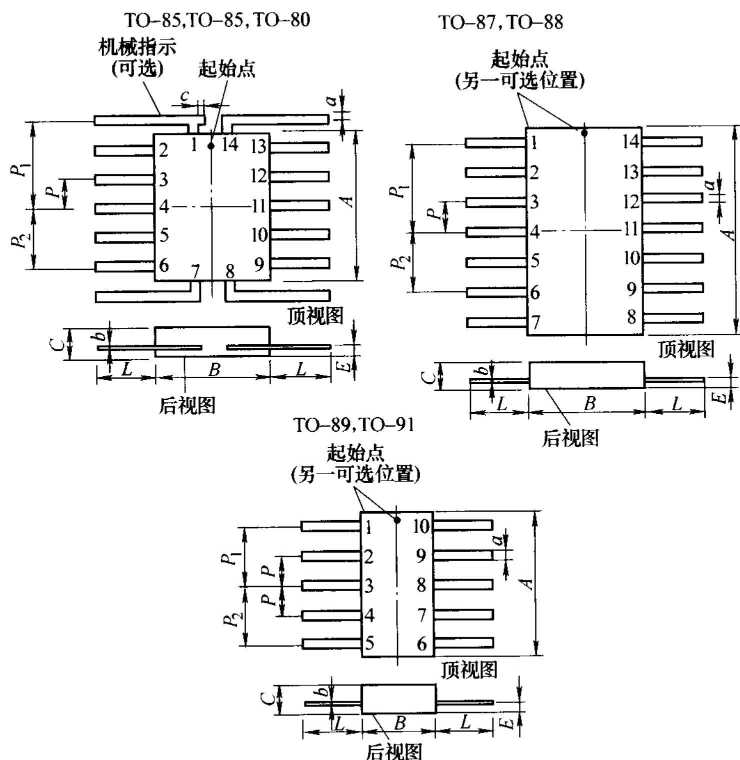


图 2-67　常见的扁平封装型集成电路（引脚间距为 50mil）

扁平封装型：它的体积比 TO-16 小，因而更适合高密度封装。它能通过回流焊接装在印制电路板的任何一面，它的引脚是条状的，不需支架就能安在电路板上，它多用于军事设备。图 2-67 所示为常见的扁平封装型集成电路。

集成电路的技术信息包括引脚连接图，图中显示了每个引脚连接的信号（见图 2-68）。集成电路的一端标有一个白点或在塑料上有一个凹口。在凹口一端最左上方的引脚就是标号为 1 的引脚。从 1 开始，引脚由左侧依次向下，至右侧依次向上顺序排列。

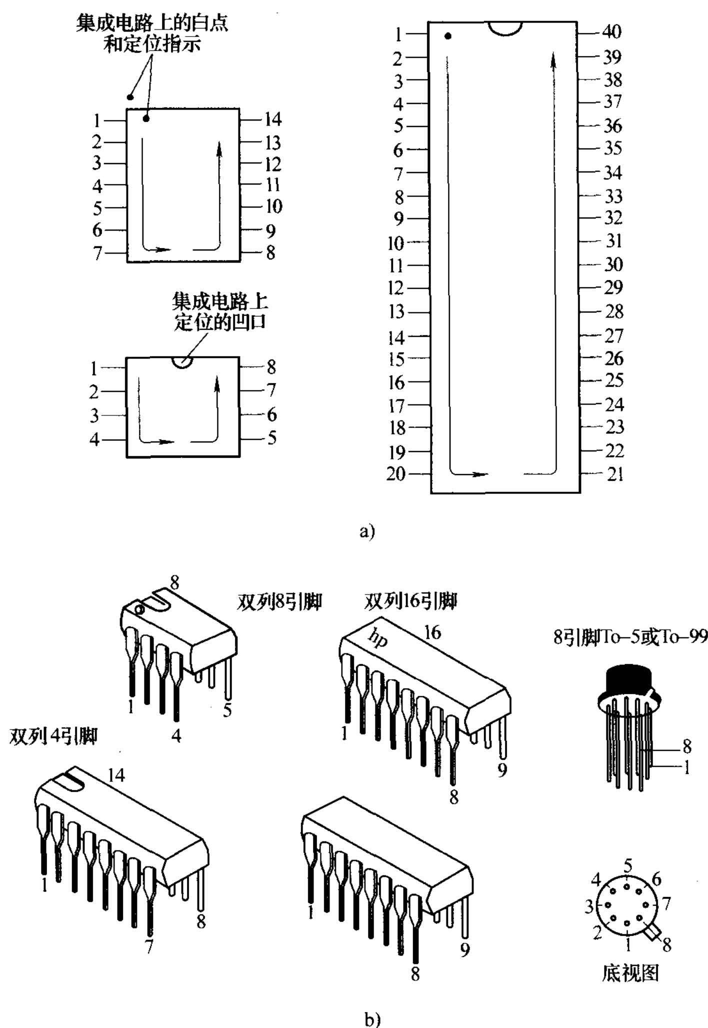


图 2-68 标准集成电路引脚排列

a）引脚原理图 b）实物图示

在引脚连接图中，连接电压的引脚用 V_{CC}表示。在大多数集成电路中，这个电压是 +5V 直流电压。接地引脚用 GND 表示。通常，在数字集成电路中，最高标号的引脚为 V_{CC}，而最高标号数字的一半就是接地引脚的标号，但这种说法并不完全准确。

2.16 微处理器

微处理器也叫做 CPU 或中央处理单元，它是装在一块芯片上的具有完全计算能力的器件，是一个集成电路。通常，它是将组成微处理器的晶体管蚀刻在一块又小又薄的硅片上。芯片大概有 1in[⊖]宽，可封装多达 1000 万只晶体管。简单处理器可能只装有几千只晶体管。

第一片用于家用计算机的微处理器是 Intel 8080，它于 1974 年制造，是一个 8 位处理器。第一次引发商业革命的微处理器是 1979 年制造的 Intel 8088，它被组装到 IBM PC（美国国际商用机器公司-个人计算机）上，大约于 1982 年面世。如果读者熟悉 PC 的发展史，那就一定知道 PC 是从 8088 发展到 80286、80386、80486、奔腾、奔腾 2、奔腾 3，直到现在的奔腾 4。所有这些微处理器都是由 Intel 公司制造并以 8088 为基础改进而成的。新奔腾系列能运行 8088 的任何代码，但奔腾 2 的运行速度仅比 8088 快 3000 倍。

微处理器是微型计算机中最重要的组件，它运行机器命令来指示处理器需要做什么。在命令的基础上，微处理器会做以下三种工作：

1）运用它的算术/逻辑单元(ALU)，微处理器能进行像加减乘除的数学运算。

2）它能把数据从一个存储单元移动到另一个存储单元。

3）它能做出决定，并根据这些决定跳转到新的命令上。

图 2-69 为微处理器完成以上功能的简明框图。这个微处理器有：

1）地址线（可能是 8、16 或 32 位宽），它把地址传送到存储器中；

2）数据线（可能是 8、16 或 32 位宽），它能把数据发送到存储器中或从存储器中接收数据；

3）RD（读）和 WR（写）线，控制存储器发送或得到一个地址信息；

4）时钟线，把时钟脉冲序列加到处理器上；

5）复位线，把程序计数器复位到 0 并且重启运行。

大部分实际应用的微处理器有 40 个或更多个引脚，为了保持这个引脚数量，需要有 8 个兼具读写功能的数据引脚。图 2-70 所示为典型的 CPU 符号及其封装形式。

⊖ 1in = 0.0254m。——编辑注

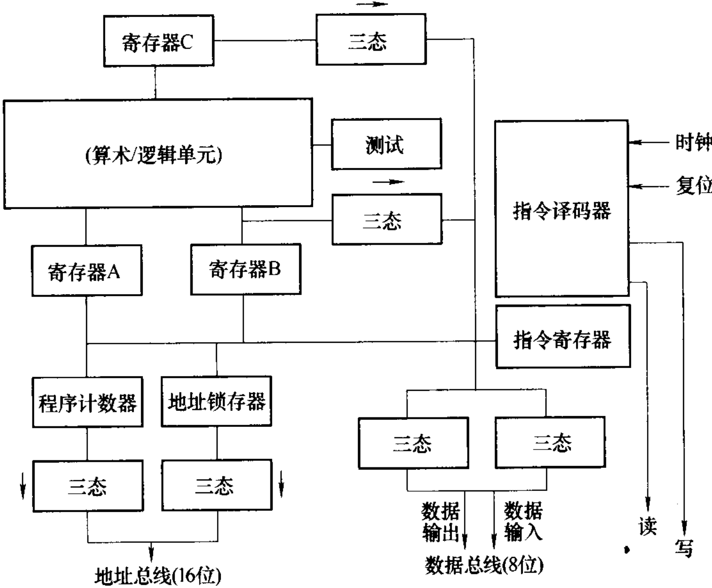


图 2-69　微处理器的简明框图

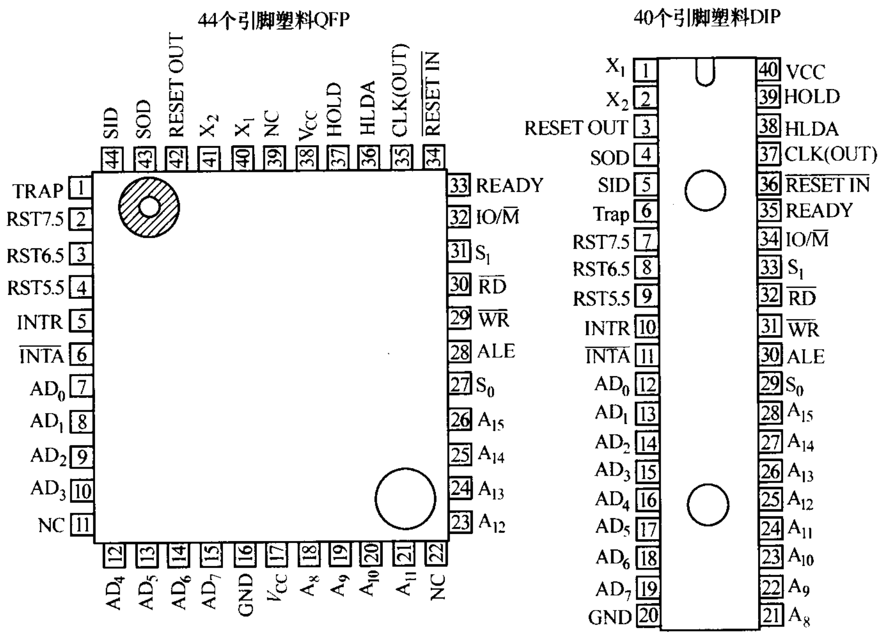


图 2-70　典型 CPU 引脚配置（Intel 80C85）和 80C85 的不同封装形式

微处理器的功能是根据存储器存储的指令处理数据的。微处理器通过一个 8 位双向三态数据总线传输数据和内部状态信息，存储器和外围设备地址通过一个独立的 16 位三态地址总线进行传输。延时和控制端用以保持信号同步以及控制，如复位、保持、准备和中断等信号输入，实现一些特殊用途。

要了解微处理器，必须理解以下术语：

1）微米：这是一个宽度单位，是描述芯片线宽的最小单位。例如，人的头发直径是 100μm。由于芯片上元器件的体积减小了，晶体管的数量增加了。现代微处理器采用的是 0.25μm 或更小的技术。

2）时钟速度：这是芯片能计时的最大速率。现代微处理器的时钟速度超过了 2GHz。

3）数据带宽：指 ALU 的宽度。一个 8 位的 ALU 能进行两个 8 位数字的加减乘等运算，一个 32 位的 ALU 能处理 32 位的数字。8 位的 ALU 必须执行四个指令才能将两个 32 位的数字相加，而 32 位的 ALU 只需运行一个指令就能完成该功能。多数情况下，外部数据总线与 ALU 带宽相同，但也不总是这样。8088 的 ALU 是 16 位的，总线是 8 位的，而奔腾的 32 位 ALU 每次可获取 64 位数据。

4）MIPS：它代表每秒百万条指令，是对 CPU 运行情况的一个评估标准。现代处理器的 MIPS 值大约是 1000，而 80286 处理器只有 1。

2.17　半导体存储器

从学术上说，存储器包括所有电子存储设备。数字存储器是一组可以从外部存取的二进制存储阵列，存储阵列可存储一组字符。每个字包括很多字节的存储元素，称作存储单元。存储器字的字长一般是 1 位、4 位或 8 位存储单元，所以，1 位、4 位和 8 位（字节）的信息可以被存储器分别存储。存储器容量就是存储器字的数量和每个字所包含的存储单元的数量的乘积。它以字节为单位，一般用 kbit 表示。$1\text{kbit} = 2^{10} = 1024$

所有基于微处理器的系统都使用两种类型的存储器——ROM 和 RAM：ROM 代表只读存储器；RAM 代表随机存取存储器。

2.17.1　RAM

RAM 在微处理系统中用于存储变化的信息。CPU 通过程序控制可以读取和改变 RAM 中的信息。RAM 建立了一个包括所有存储器件的通用范畴，其中任何地址的内容都可以随意存取，并且可以与其他地址的内容同时存取。

RAM 有静态和动态两种。静态和动态的 MOS RAM 都很常用，因为动态

RAM 的优点是电路密度高、制造成本低；静态 RAM 的优点是工作电源单一，不需要刷新，并且功率耗散较低。

1）动态 RAM。在动态 RAM 中，信息是以 MOS 晶体管栅极电容的电荷形式来存储的。由于这种电容不是理想的，会有漏电，如不定期刷新，信息很可能随时间推移而丢失。这种现象可能会在不同的情况下发生，并且与所用器件的类型有关。

2）静态 RAM。静态 RAM 不需要刷新，因为其存储单元是双稳态的，类似于传统触发器的设计。通常，静态 RAM 比动态 RAM 消耗的功率更多，但它所需的辅助电路较少。并且，无须考虑存储器刷新周期与正常 CPU 读写操作同步的问题。

当信息被存储在存储器中时，就说它被写入到了存储器。当从存储器中重新得到信息时，就说信息被读出，这是静态存储器仅有的两种功能。信息的写入是在写“周期”内完成的，信息的读出则是在读“周期”内完成的。术语“周期”表示读出或写入信息所需的一段固定的时间。实际上，电子数据或信息是用直流电平的形式来存储的，一个直流电平相当于一个“1”存储在存储器中；另一个直流电平则相当于一个“0”存储在存储器中。

在半导体存储器中（见图 2-71）中，数据从器件上一个标有“数据输入”的输入引脚写入，从标有“数据输出”的引脚上被读出。因此，一个 1bit 存储器件要有四个主要的物理连接：电源输入（V_{CC}）、数据输入（D_I）、数据输出（D_O）和读出/写入周期（R/W）。如果想要存储一个 16bit 的信息，那么存储器就需要四个地址引脚（$2^4=16$）（见图 2-72），那样，从存储器中读写信息就不需要特别排序了。

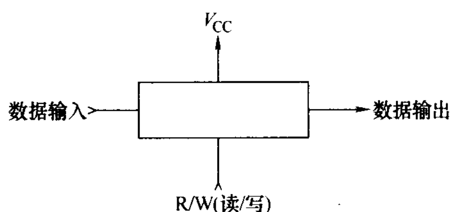


图 2-71 1bit 存储器的框图

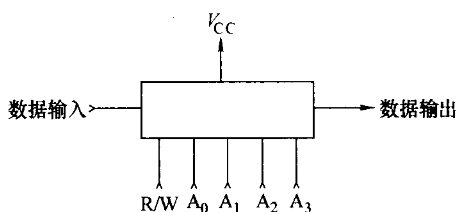


图 2-72 16bit 存储器的框图

图 2-73 为典型的 1K×1 字节静态 RAM（Intel 公司制造，2125A）的引脚结构、逻辑符号和框图。它是 16 引脚双列直插封装，工作电压为 +5V 单一电压，它的输入和输出都直接与 TTL 器件兼容。它具有三态数据输出，并能通过片选输入（CS）对存储器进行扩展。除了有十个地址输入线可为所有 1024 个字选址外，还有读或写控制操作。当芯片使能端（CE）为高电平时，数据输出（D_{out}）

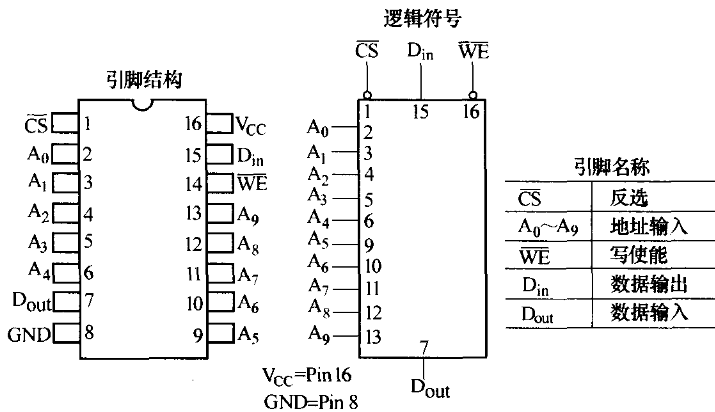


图 2-73　Intel 2125A 的引脚结构

为高阻抗状态。

2.17.2　ROM

在基于微处理器的系统中，ROM 一般用于保存指令程序和数据常量，例如需要查询的表。和 RAM 不同，ROM 是稳定的，例如，当电源关闭时，存储器的内容不会丢失。ROM 芯片上的数据是不会改变的，只能用专门的指令进行改变，这意味着关闭电源将不会导致数据丢失。

以下是五种基本的 ROM 类型：

1）ROM；

2）可编程只读存储器（PROM）；

3）可擦可编程只读存储器（EPROM）；

4）电可擦除只读存储器（EEPROM）；

5）闪速存储器。

掩模可编程 ROM：它们是由制造商根据用户需要进行编程的。这种 ROM 只有在需求量非常大的时候才使用，因为在芯片上生成位图的前期开支非常高。这种 ROM 的内容建立后就不能更改了，芯片做好后，实际的成本很低。它们所需功率很小，可靠性非常高，用于大多数小型电子设备，包括所有必须的程序设计。

PROM：该存储器是由用户自己编程的。有选择地熔化（开路）每个存储单元的金属或多晶硅连接，从而使存储单元处于固定状态，这个过程是不可逆的。有一种 PROM，它里面的信息是作为 MOSFET 单元的电荷来存储的，任何人都可以用编程器给空白 PROM 芯片编码，这个过程被称为“烧制 PROM”。

PROM 的内容在紫外线照射下能被删除。删除之后，PROM 可以输入一个新

的格式。在基于微处理器的系统中，PROM 一般用于系统研发阶段，整个产品的运行情况还没有达到制造掩模可编程 ROM 的要求。

PROM 只能一次性编程。它比 ROM 更脆弱。静态电流不稳定时很容易引起芯片的损坏。但空白 PROM 较便宜，而且在昂贵的 ROM 制造过程前，它可以更好地用来研制 ROM 数据原型。

EPROM：这种器件可以对芯片多次重新写入。EPROM 的设置通过一个 EPROM 编程器完成，这种编程器提供一种专门的电压，其电压值由所使用的 EPROM 类型而定。

为了清除芯片以前的信息，EPROM 需要一个能发射一定频率紫外线的专用工具。因为紫外线无法穿透绝大多数的塑料和玻璃，每个 EPROM 芯片顶部都有一个石英窗口。为了能正常运作，EPROM 与擦除器的光源距离很近，一般不超过 1in 或 2in。EPROM 擦除器没有选择功能，它会擦除整个 EPROM 的内容。EPROM 被放置在擦除器的紫外线下几分钟后，必须被移走。如果被置于紫外线下时间过长，EPROM 会被过度擦除，这样，芯片就不能再被编程了。

EEPROM 或主读存储器（Read Mostly Memory，RMM）：这种存储器的内容可以通过电信号更改，但这个过程很慢，它所需要的电压和电流技术在普通逻辑电路中很难找到。

闪速存储器：这是 EEPROM 的一个类型，通过将整个芯片或是其预先定义的区域（称为“块”）置于一个电场中，闪速存储器的工作速度比传统的 EEPROM 快得多，因为它是将数据写入块中，它一次写入 512 字节数据而不是一次 1 字节。

图 2-74 所示为一个典型 ROM 的符号，它可以存储 1024 个 8 位的字，也可称作 1K×8ROM，这里的 1K 代表 1024。同样，2048×8 可写成 2K×8，依次类推。因为 1K ROM 可存储 1024 个不同的字，因此它需要 10 个地址输入线（$2^{10}=1024$），字的大小是 8bit，因此有 8 个输出线。存储器芯片可通过片选输入控制启动或关闭。ROM 不提供数据输入或读/写控制，因为它通常没有写入操作。一些 ROM 为初次写入数据提供专门的输入设备，一般在符号中标明。

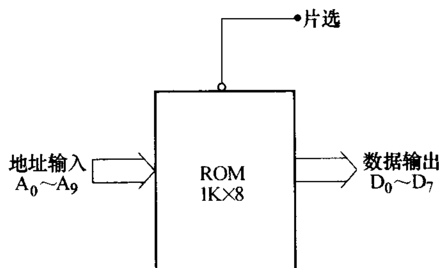
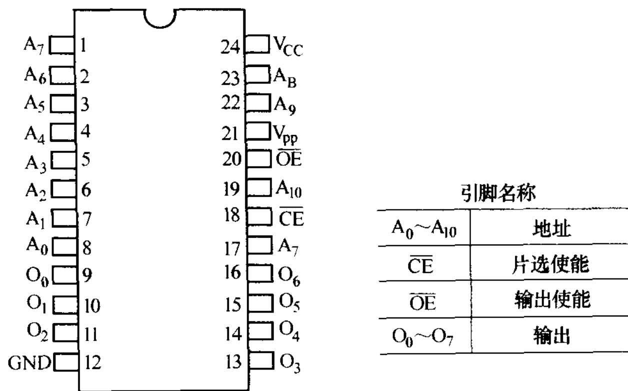


图 2-74　ROM 的典型符号

Intel 2716 是一个 16 384（2K×8）bit 的紫外线擦除电可编程 ROM。图 2-75 为 2716 EPROM 的引脚结构和框图。



引脚名称

A_0~A_{10}	地址
$\overline{CE}$	片选使能
$\overline{OE}$	输出使能
O_0~O_7	输出

图 2-75　Intel 2716 EPROM 的引脚结构

2.18　微控制器

微控制器是一个装在独立集成电路块上的单片微型计算机。它包括 CPU、时钟电路、ROM（闪速）、RAM、串行端口、计时器/计算器和 I/O 电路。不像传统的微处理器那样，它不需要很多辅助芯片协助运行。

绝大多数微控制器采用 40 引脚的 DIP 封装，引脚包括多达 32 个 I/O 线，其余为电源、复位中断和定时端口。单片微控制器的指令集和微控制器所属的微处理器类别很相似。

微控制器已经应用很长时间了。1976 年 Intel 公司制造了 8048（MCS-48，一个 8 位微控制器），它不断向前发展，新型号为 8051 系列，采用高性能的 40 引脚 DIP 封装。近年来，微控制器的功能发展很快，如今，已经有了实现数据采集系统和控制操作的单机微控制器，它的芯片上有 A/D 转换器，从而使其能直接应用于仪器设备。

运用 CMOS 技术的一种最流行的微控制器是 89C51，它有 4KB 的闪速 EEPROM。它的指令系统和引脚都与工业标准 MCS-51 兼容。闪速功能可使存储器在系统编程，这个过程也可以用传统的固定存储器的编程器完成。微控制器有 DIP 或 QUAD 两种封装形式。

2.19　表面贴装器件

传统的用于印制电路板的穿孔安装技术已经逐渐被表面贴装技术取代。现在特殊的小型器件可直接贴焊到印制电路板表面，而不是采用把带引脚的器件

插入电路板上插孔的安装方法。表面贴片器件（SMD）及其封装很适合于自动装配。表面贴装的优点是能使产品更加合理、体积更小和可靠性更强。生产表面贴片器件的主要原因是为了增加封装密度并减小电路板面积，这是为了适应电子设备，特别是便携式电子设备小型化的市场需求。

图 2-76 所示为传统的穿孔技术，器件被放置在印制电路板的一面，而在另一面进行焊接。图 2-77 所示为表面贴装技术，器件可安装在印制电路板的任何一面。器件可用焊接胶或绝缘胶粘在印制电路板表面，然后再焊接。

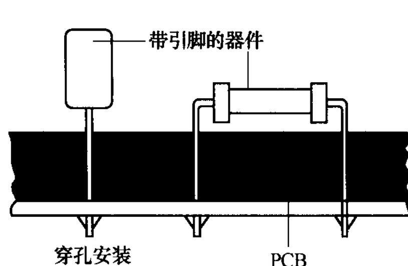


图 2-76 传统穿孔技术

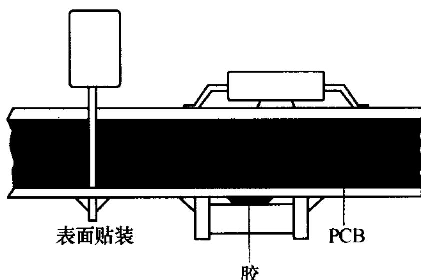


图 2-77 表面贴装技术

此外，还有一些混合电路，包括较厚和较薄的薄膜电路，主要是无引脚器件。这些器件被回流焊接在陶瓷或玻璃的基板上，另外基板上还集成了其他器件。图 2-78 所示为混合电路的安装方法，包括集成在基板上的元器件和焊接的芯片。

因为表面贴装技术不适用于所有器件，一般电子设备中都是带引脚器件和表面贴片器件混合使用的。

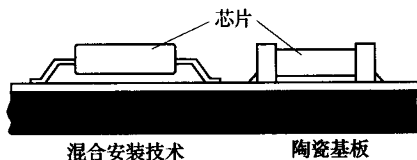


图 2-78 混合电路的安装方法

与高密度 VLSI 相比，100mil 引脚间距的 DIP 封装使得其引脚数量受到很大限制，其最大引脚数是 64。系统的小型化发展迫使表面贴装技术发展新的封装形式，带有翼形引脚的小外型封装（SO）组件的引脚间距是 50mil。为了容纳更多的引脚数，带有 J 形引脚的方形封装在工业应用中越来越受欢迎。随着引脚数增加到 300 以上，引脚间距从 50mil 减小到了 30mil，直至 25mil。

2.19.1 表面贴装器件

表面贴装器件的缩写为 SMD，它是表面贴装技术中应用最普遍的名称。SMD 设计为焊盘或短引脚的形式，但是它比带引脚器件的引脚要小的多。与传

统的穿孔器件相比，SMD 不需要插入电路板孔中，它可以直接粘贴在电路板表面，再进行焊接。

电阻器、陶瓷电容器和离散半导体占了全部 SMD 的 80%。通常，对于 SMD 的外形来说，立方体比圆柱体更流行，因为后者只有两个引脚，只适用于电阻、电容和二极管。如果由于电气或经济原因 SMD 没有更好的封装形式，那么双列直插封装的器件就折弯其引脚从而变成了表面贴装形式。

引脚类型：SMD 有很多种不同的引脚类型。图 2-79 所示为常用引脚类型。图 2-80 所示为不同引脚类型的各种 SMD 的形状。

类型	图样	元器件
翼行引脚		SOIC QEP TSOP
J形引脚		PLCC SOJ
球状引脚		BGA 芯片级封装 倒晶封装
镀金属终端		电容器 电阻器 铁养体

图 2-79　SMD 引脚类型

引脚间距：SMD 的引脚间距是按照两个引脚中心之间的距离计算的，并不是图 2-81 所示的引脚间的空白间隔。

器件封装方式：印制电路板是用拾取和放置机器进行自动封装的，因而需要采用正确的封装形式来保护器件，特别是 SMD，以免在传送过程中损坏。对于不同的封装方法，接收器件需要合适的送料器，有盘装、管装、

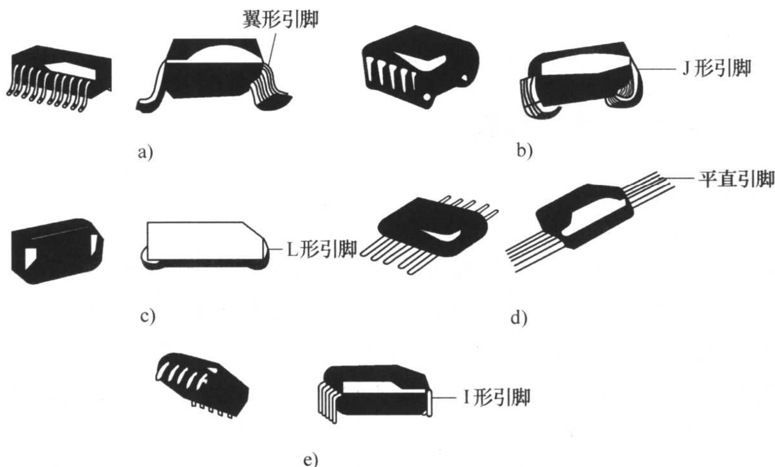


图 2-80　采用不同引脚类型的 SMD 形状

a）翼形引脚：金属引脚向下向外弯曲　b）J 形引脚：金属引脚向下向外弯曲成字母 J 形
c）L 形引脚：引脚向内弯曲　d）平直引脚：从元器件两侧水平伸出
e）I 形引脚：通过切断穿孔元器件引脚改成的 SMD 引脚

带盘状和散装盒，如图 2-82 所示。

芯片尺寸标识：芯片器件的尺寸是用 4 个数字表示的，其中并不包括器件的厚度。图 2-83 所示为器件尺寸详细的举例说明。尺寸可使用英寸或米制标注，例如，陶瓷电容器和电阻器的尺寸一般用英寸标注。钽电容器一般用米制标注。

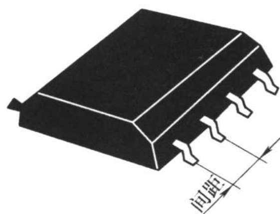


图 2-81　SMD 引脚间距

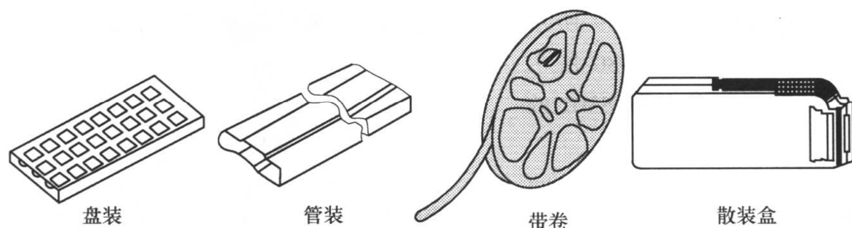


图 2-82　SMD 封装技术

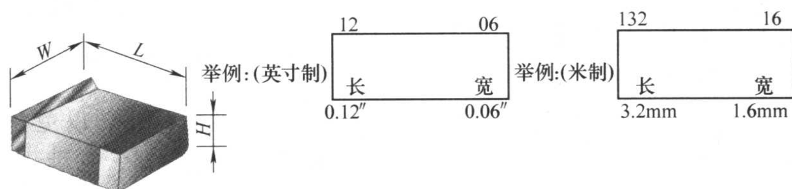


图 2-83　芯片尺寸标注

2.19.2　半导体 SMD 的封装

随着表面贴装技术的发展，出现了许多封装形式。以下是一些常用的半导体 SMD 的封装形式。

SOIC（小外形集成电路）封装：它是塑料封装，封装为 6、8、10、14 和 16 条引脚时，宽度为 4mm，封装为 16、20、24 和 28 条引脚时，宽度为 7.6mm。引脚的间距为标准的 1.27mm，并且向外伸展以便引脚的末端平放，便于与印制电路板连接（见图 2-84）。此外还有两种 VSO（超小型）封装，引脚数分别为 40 和 56，引脚间距为 0.762mm。

SOT（小外形晶体管）封装：它是用离散的晶体管和二极管构成的。最常见的封装是 SOT-23 和 SOT-89（现已改名为 TO-236 和 TO-243），图 2-85 所示为典型的 SOT-23 的结构和标准封装尺寸，它的封装有三条引脚，一端有两条引脚，另一端有一条引脚。较大的半导体芯片（长宽大约为 1.5mm）封装为 SOT-89（见图 2-86）。它的三条引脚都在同一端，但中间一条引脚要穿过器件底部，以

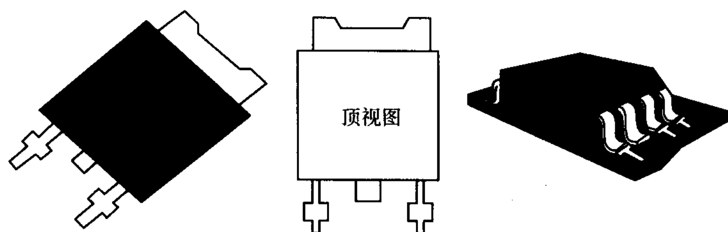


图 2-84　SOIC

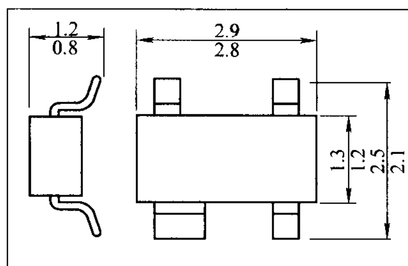


图 2-85　SOT-32 封装

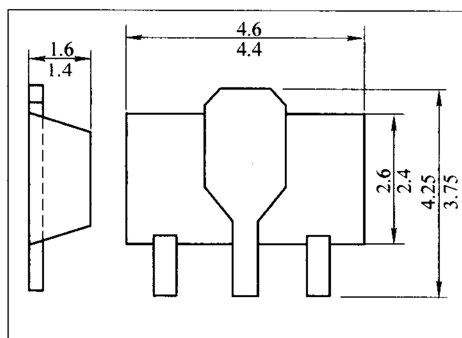


图 2-86　SOT-89 封装

便增强散热。

图 2-87 所示为 SOT-194，它适用于大功率应用，当与合适的散热板相连时，可以承受高达 4W 的功率耗散。图 2-88 所示为 SOT-143 的封装外形，它有四个引脚，用作双栅器件。

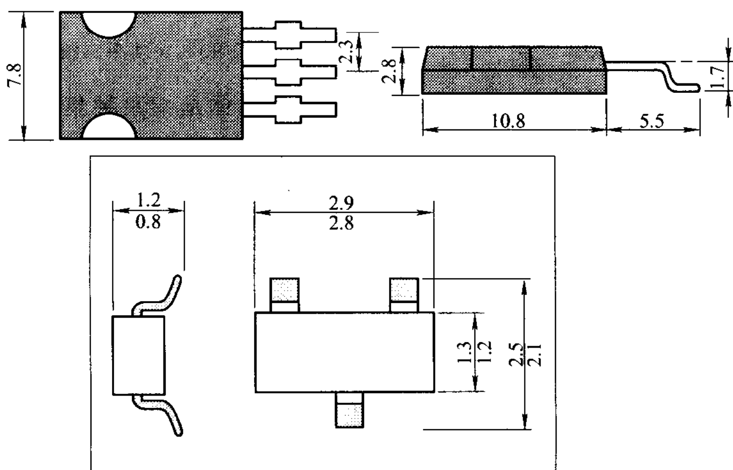


图 2-87　SOT-194 封装

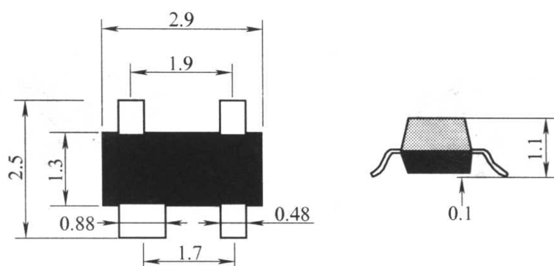


图 2-88 SOT-143 封装

圆柱形二极管封装：两种最常见的二极管专有的圆柱形封装是：

1）SOD（小外形二极管）封装是专为小型二极管芯片设计的，其功率耗散最高为 250mW。这种器件的典型例子是 SOD-80，封装尺寸如图 2-89 所示。

2）MELF（金属电极表面黏合）封装为较大的圆柱体封装，它主要用于更大功率操控能力的设备。图 2-90 所示为 MELF 二极管的典型尺寸。SOD-80 封装有时也称作 Min MELF（小型金属电极表面黏合）封装。

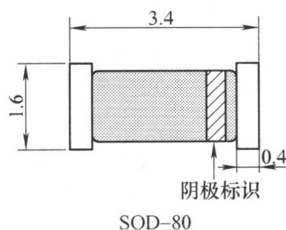


图 2-89 SOD 封装

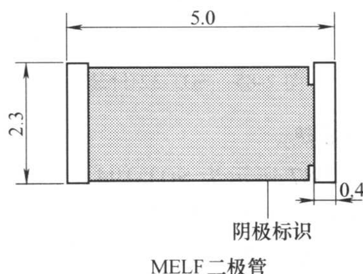


图 2-90 大功率二极管封装

LCCC（无引线陶瓷芯片载体）封装：芯片载体是指某种集成电路封装组件，它的形状是立方体或接近立方体，它的四个方向都有引脚伸出。LCCC 器件没有引脚，也没有任何附加的封装材料。这种封装的器件适合直接焊接或粘贴在带有引脚的插座上。在这种器件中，集成电路芯片被黏合在一个陶瓷基板上，连接导线与一个可焊接的焊盘相连。如图 2-91 所示。

LCCC 的引脚数通常有 18、20、28、32、44、52、68、84、100、124 和 156 个，元器件高度是 1.5 ~2.0mm，引脚间距一般是 1.27mm。

PLCC（塑料封装有引线芯片载体）封装：它应用广泛，并且与 LCCC 的形状大小相同，这种元器件的引脚间距也是 1.27mm。大多数的 PLCC 采用折叠在器件下方的 J 形引脚。如图 2-92 所示。由于 J 形引脚折叠在器件下方并不突出，这就给电路的检查和测试带来了困难。

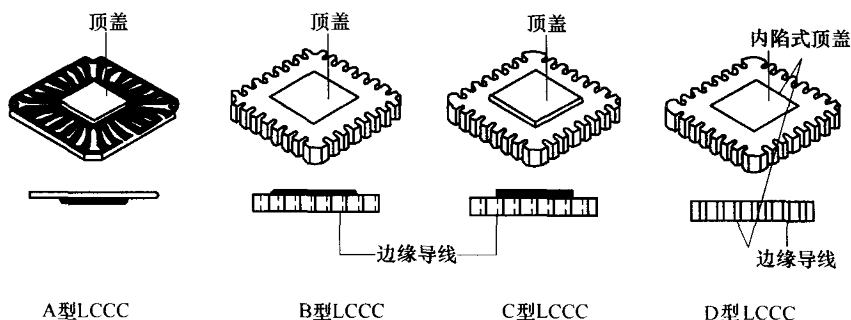


图 2-91　LCCC 封装

扁平封装和方形封装：扁平封装器件的引脚和主体在同一个平面上。最初的扁平封装引脚从两侧伸出，但现在它的四个方向都有引脚，所以叫做方形封装。方形封装通常是高引脚数的塑料封装，其引脚数一般为 40 ~ 200，封装的尺寸不变，但引脚间距随引脚数量而变。例如，64 引脚封装的引脚间距为 1.0mm，80 引脚的引脚间距为 0.8mm，100 引脚的引脚间距为 0.65mm。图 2-93 所示为方形扁平封装的形状。

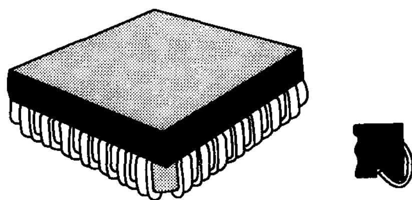


图 2-92　J 形引脚 PLCC 封装

LGA（触点阵列）封装：在这种器件中，引脚从封装体底部而不是周围伸出，并成矩阵式排列（见图 2-94）。引脚为栅格阵列的表面贴装形式就是 LGA 封装，它的引脚被基板上的一组焊垫代替。为了适应不同的引脚排列需求，它有很多种形状、焊垫尺寸和焊垫密度。

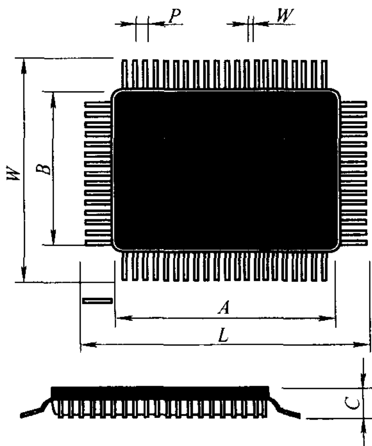


图 2-93　方形扁平封装

BGA（球栅阵列）封装：这种封装囊括了几乎所有由冲模引出连接至印制电路板焊球的集成电路封装组件。这种封装可适用于高性能、高密度引脚排列，引脚数目如今可达 1000，一般为 300 ~ 600。典型的 BGA 封装由一个覆有两层金属膜并带有导通孔的基板构成。集成电路冲模贴在基板的顶部，并装在一个塑料模内（见图 2-95）。球形引脚间距从 1.27mm 减小到 1.0mm，在新的芯片中，可减小到 0.5mm。为了达到更高的可靠性，许多供应

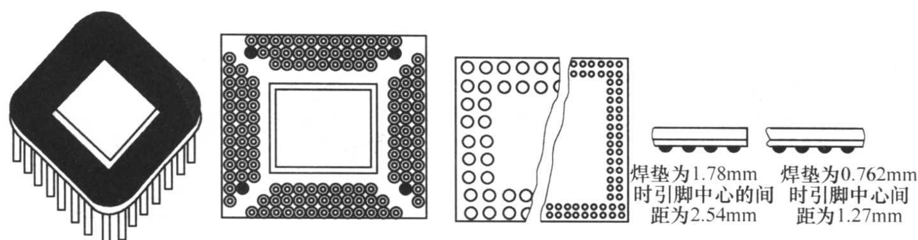


图 2-94 LGA

商将 BGA 安装到陶瓷基板上。多芯片封装组件一般由带有 2~4 个冲模的 BGA 或 QFP（方形扁平封装）组成。

BGA 上球形引脚的不同排列方式有：全栅格式、周缘式、交错式和散热孔式（见图 2-96）。其他类型的“栅格阵列”的首字母缩写是：

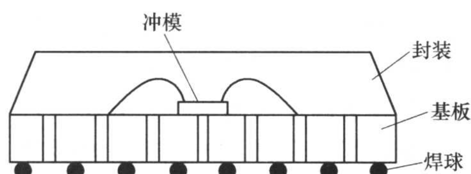


图 2-95 塑料衬底球栅阵列封装

CBGA——陶瓷 BGA，适用于高温条件；

FBGA——柔性 BGA，使用柔性聚酰亚胺基板；

SBGA——超级 BGA，顶部有金属散热装置；

PBGA——塑料 BGA，工业标准 BGA；

LGA——触点阵列，无球形引脚焊垫；

CGA——柱形栅格阵列，焊垫为柱形而不是球形；

CSP——芯片级封装，细距 BGA，封装组件最大为芯片尺寸的 120%；

μBGA——芯片级封装，Tessera 的商标；

Flip Chip——带有焊锡凸块的冲模，很小。

COB（芯片于板上）封装：这种方法是将裸露的半导体元器件用环氧树脂直接粘贴在印制电路板上，再进行引线键合及胶封。由于是将芯片直接引线键合到印制电路板上，所以它的组装密度更高，信号传输更快。

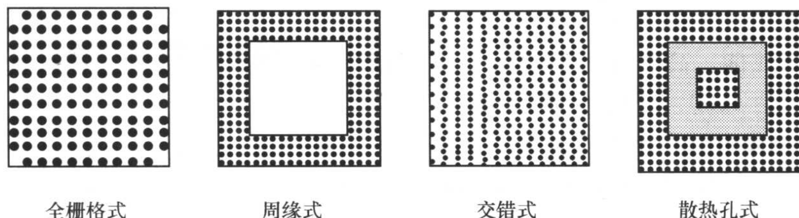


图 2-96 BGA 的不同排列模式

2.19.3 无源元器件的SMD封装

为了充分利用SMD技术的优势，人们期望把器件，而不仅仅是半导体，也做成贴片封装形式。这些器件包括电阻器、电容器、电感器等。电容器和电阻器可以是立方体，常被称作“芯片”。最常见的芯片元器件是电阻器、电容器和二极管。其实，所有双端元器件都有芯片形状。最常见的封装是长方体，这种器件只在端面才可焊接，此外，顶部和底部或侧面也可以。图2-97所示为芯片器件镀金属法的典型例子。

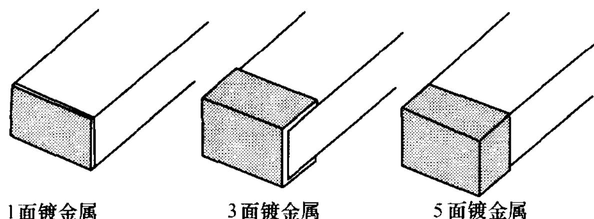


图2-97 在芯片器件1面、3面、5面镀金属法的区别

图2-98所示为不同类型电容器、电阻器和电感器的封装方法。

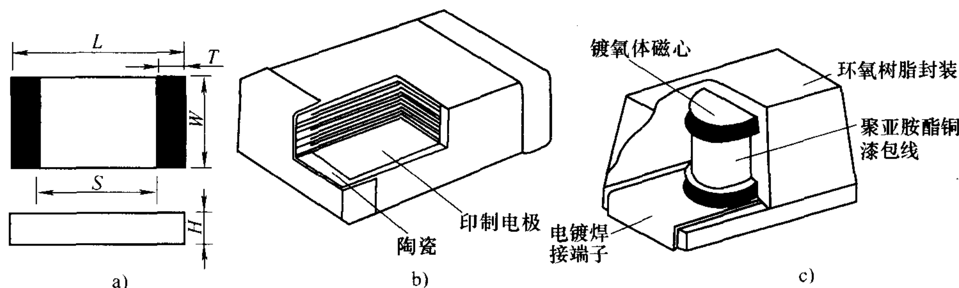


图2-98 表面封装
a）电阻器 b）电容器 c）电感器

2.20 散热器

电子器件，特别是半导体元器件，有温度依赖的性能。如果温度过高，超过额定范围，它们就会彻底损坏。因此，必须要知道有源元器件产生多大的热量，并对其热量进行处理。这项工作就是由散热器来完成的。

分立电源器件的封装设计通常都便于安装散热器，因此，就需要使封装器件和它的散热器有很好的连接，最好在金属表面涂上一层薄薄的硅脂，以便增

强热量传导能力，把没有与散热器接触到的金属部分产生的热量散发掉。另外，螺钉接口也要保持足够的压力。

双列直插封装（DIP）的电源一般会有一个金属接片，通过它可以更好地将热量传送至外接散热器，图 2-99 就是这种装配结构。

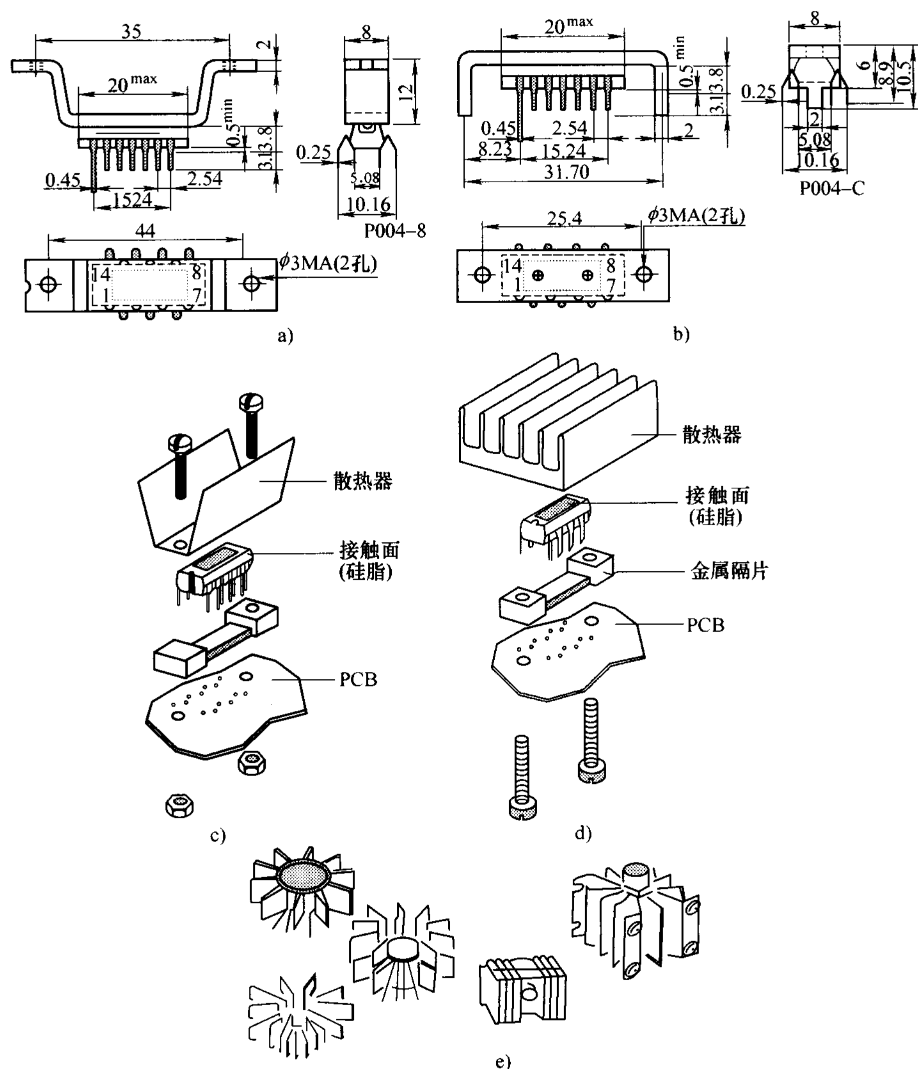


图 2-99　散热器

注：a）和 b）为带有嵌入式金属散热器的两种 DIP，供应商已经在其上焊接了一个外接散热器；c）和 d）是制造商（SGS-ATES）建议的具有较强散热功能的典型装配结构；e）是散热片式散热器。尺寸单位为 mm。

一些 DIP 封装件两面有可接散热器的突起，有时会把这个突起焊接在印制电路板器件面较大的覆铜片上，把覆铜片作为散热器。

2.21 变压器

变压器是通过电磁感应把电能从一个电路传导到同频率但不同电压电流值的另一个电路的电子器件。在电子设备中，变压器的主要作用是通过适当改变电源电压，为电路提供所需的直流电压。按照变压器传输电子能量的变化趋势，它被称作升压变压器（电压按一定比例增加）或降压变压器（电压按一定比例减少）。如果电压值没有变化，就说电压比为 1:1。

变压器的工作原理是将电压从一个线圈（初级线圈）感应到第二个或更多的线圈（次级线圈），因此，变压器的符号中同一芯体上有两个或更多个线圈，如图 2-100 所示。线圈离得很近，以便产生电磁或电感耦合。从初级线圈输入电压，从次级线圈输出电压，初级线圈一般在左边，以便使信号从左向右传输，从右边输出。

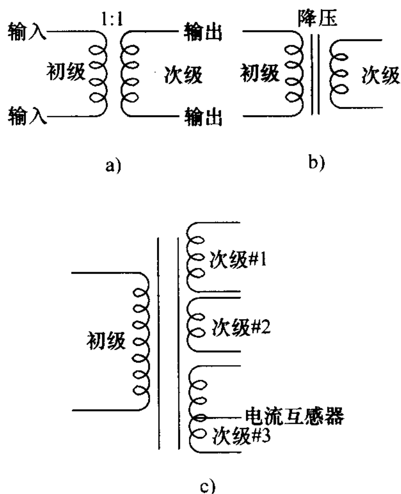


图 2-100　变压器

a）空心线圈　b）有铁心线圈

c）电源变压器

变压器可以是空心的，也可以是铁心的。空心变压器用于耦合高频信号。电源变压器一般都有铁心，并有两个或更多的次级线圈，这些线圈可产生不同的电压，以便适应不同电路的需要。

2.22 继电器

继电器是一种机电器件。它由一个电路的磁性线圈（螺线管）动作来控制触点与另一个完全不同的电路进行连接或断开。继电器的磁性线圈和它的触点可能出现在电路图的不同位置。

继电器的电路符号与它的结构和在电路中的作用很相似。图 2-101a 所示的

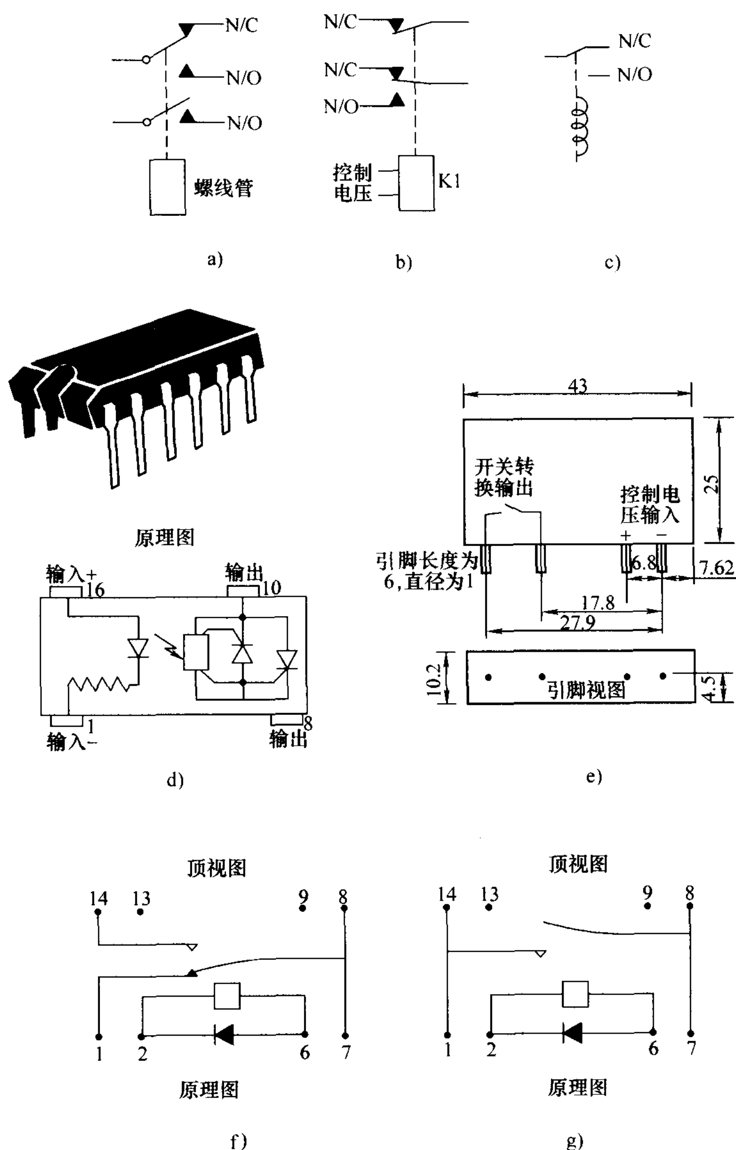


图 2-101　继电器的种类和电路符号

a）包含两个常开触点和一个常闭触点的继电器　b）常闭触点继电器　c）继电器的另一种电路符号　d）输入/输出端带有光电隔离的固态继电器，比列直插封装　e）单列直插封装　f）簧片继电器，1～8引脚常闭，动作时改变为8～14引脚　g）簧片继电器，8～14引脚常开，动作时闭合

继电器包含两个常开触点和一个常闭触点，图 2-101b 所示的继电器是常闭的。在图例中，继电器一般是不通电时的状态。当继电器通电时，常开触点闭合，而闭合触点断开。继电器（感应线圈）的另一种电路符号和电感器很相似，图 2-101c所示的开关符号是继电器最常用的符号。

1. 固态继电器

固态继电器采用密封结构并且没有可移动的部分，它特别适合要求高稳定性和使用寿命长的直流开关。这种开关是无声的，不会产生电弧，也不会受振动和腐蚀性空气的影响。如图 2-101d 所示，控制输入端是光电隔离的，它通过零电压开关电路进行控制，不产生任何射频干扰，它是由 TTL 断路集电极启动运行的，输出电路一般都是常开的。这种继电器的封装类型有单列直插封装（如图 2-101e 所示）和双列直插封装。

2. 簧片继电器

簧片继电器里有一个线圈（见图 2-101f 和 2-101g）用来在通电时控制触点动作，它的封装类型是双列直插封装。这种继电器里有一个跨接线圈的二极管用来防止驱动电路被反向电动势损坏。继电器常态下触点断开，当施加交流电（230V）时触点动作。它通常和三端双向晶闸管触发开关一起使用。

2.23 连接器

印制电路板上的连接器为所有输入输出信号、电压和地线提供通路。电路板上的连接器通常是一个插头，它能插入一个插座内。图 2-102a 为插头的电路符号，图 2-102b 为插座的电路符号。插头是连接器的可移动部分，而插座是固定的（见图 2-102c）。插头不接插座时是不带点的，以免工作人员接触引脚遭到电击。

插头的电路符号像一个箭头，插座的电路符号像箭尾。连接器的类型可以是插头，也可以是插座，如图中所示。插头必须标示在电路图上部，并要有虚线连接到每一个连接点。

为了方便，电路图中连接器的连接点被标了号。它们给出了其在电路中的位置，这不需要按字母顺序或数字顺序排序。图 2-102d ~ 图 2-102j 为各种类型的连接器。

2.24 几个常用标准

1）IPC-M-109：元器件操作指南。包括最新版本的 IPC 标准及有关分类和湿度敏感元器件使用的指导，包括怎样封装、使用、储存和测试，以便在装配过

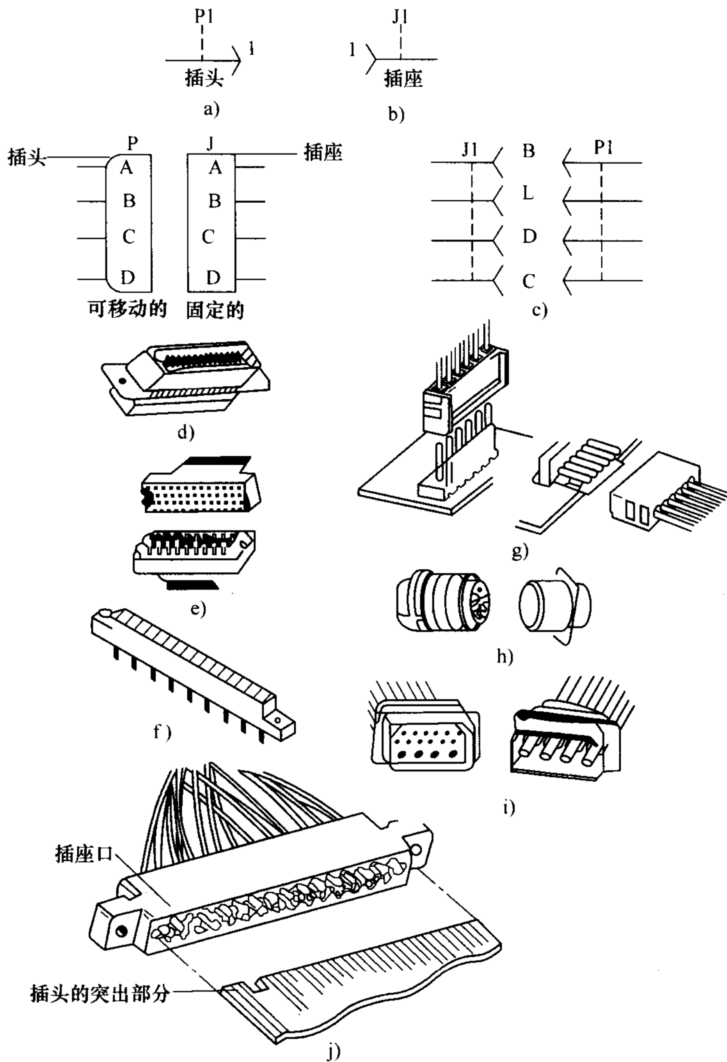


图 2-102 连接器

a）连接器的插头 b）连接器的插座 c）连接器的插头和插座部分
d）底盘插件连接器 e）底板连接器 f）印制电路连接器
g）压接外壳和 PCB 管座 h）卷缆柱和塞柱
i）支架和镶板 j）PCB 插座

程中所有元器件都能协调一致。

2）IPC/JEDEC J-STD-020B：非密封固态 SMD 的湿度/回流灵敏度分类。确定了对湿度敏感的非密封固态 SMD 的分类等级；也包括在较高温度下对元器件

引脚装配的限制。

3）IPC/JEDEC J-STD-033A：湿度/回流敏感 SMD 的操作、封装、运输和使用。为 SMD 的制造商和用户提供对湿度/回流敏感的 SMD 的操控、封装、运输和使用的标准方法。

4）IPC-DRM-18F：元器件定义的桌面参考手册。包括彩色的 3D 图示和对 40 多种最常用穿孔和 SMD、连接器和其他运用于电子设备的硬件的完整描述；还有一个术语部分，包括极性、定位、封装、引脚类型、分类 ID 字母和元器件参考标识（CRD）的最新信息。

5）IPC-TA-723：SMD 的技术评估手册。共有 71 章，包括表面贴装技术所有方面的信息，还包括常用 SMD 溢出、封装定义、设计需考虑事项、封装元器件的加工材料、加工需考虑事项、质量评估和可靠性之类的专题。

第3章　版面规划与设计

3.1　识图与绘图

3.1.1　框图

所有的电子设备都可以看作是由一系列相互作用的元器件组成的系统，这些元器件对输入响应产生输出。一个系统由于太复杂而不能够对其进行非常详细的分析，这种情况是很可能发生的。因此，就很有必要将其划分为各个子系统，然后再把它们集中在一起。把每一个子系统都用一个功能方框代表，然后再把所有的这些方框组合起来就组成了这个设备的功能“框图”。一个方框仅仅是具有一定输入和一个输出的“黑盒子”，但是却能完成一定的功能，这些方框之间的连接线则代表信号从一个方框传递到另一个方框或从一个电路传递到另一个电路。有了这样的框图，就能够很容易地了解电路的功能了。图3-1为一个典型的简易录音机的框图，图示说明了一个设备中不同的子系统。

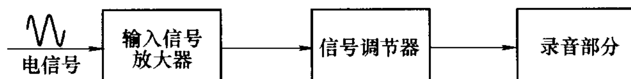


图3-1　方框图的概念

微处理器、计算器等集成电路可用独立的方框表示。这些方框标有引脚标号、信号和内部的互连线。

3.1.2　原理图

原理图就是表示一个设备的各个电子、电气和机电组件之间相互连接关系的图形。在电子电路设计中，首先要有一张原理图，原理图中可以标识出组成这个设备的各个元器件。此外，在设计印制电路的过程中，第一步就是把原理图转化为布线原图。因此，对于任何一个印制电路设计者来说，学会读和分析原理图是非常重要的。当然，一张原理图并没有任何印制电路板机械部分的详细说明。

原理图可为设计者提供最全面的设计层面，并且包括所有的需要用到的元器件。除此之外，原理图还可向设计者提供以下方面内容（Mentor Graphics，2002）：

1）可以清楚地显示出设计过程中各个部分的情况；

2）原理图是正在开发的可交付使用的产品的设计和批量生产的最主要的原始资料；

3）设计的不同由原理图中的一些细微差异所造成；

4）要根据原理图对产品进行检测；

5）现场服务也要依据原理图；

6）材料清单同样要根据原理图列出。

总之，原理图是产品电子数据的最集中体现，同时它也被视为是一套最重要的商业文档，根据原理图可决定产品的各个方面。

通常，一个设备中的每一个部件在原理图中都标有一个表示该部件的装配符号。通过这些符号，各个元器件在原理图中被表示出来，同时也清楚地表示出了电路的工作步骤。这些部件符号通常遵循不同的标准，而不同的标准之间有很大的差异。因此，建议在准备阅读一个原理图之前，最好首先明确它遵循的是哪一个标准。原理图也被称为“电路图”。

在原理图中，部件符号可以表示元器件在电路中所起的作用，也可以表示元器件的实际结构。例如，电容器可以像电池一样存储电荷。两个同样长度的平行板中间有一定的间隔，这样的图形就是电容器的符号。在多数情况下，部件的电路符号都缘于其在电路中的作用及它们的结构或两者兼而有之。

原理图中所有的电子元器件都已经被规范化。通用的划分方法是由 ANSI（美国国家标准学会）、IEEE（电气和电子学工程师协会）和 IEC（国际电工委员会）所规定的，如表 3-1 所示。

表 3-1　参考规范（参考：元器件名称，IPC-DRM-18F，桌面参考手册）

元器件	ANSI/IEEE	IEC	元器件	ANSI/IEEE	IEC
放大器	AR	A	二极管	D 或 CR	V
电容器	C		发光二极管	DS（显示）	E
封装	C		电压整流器	D 或 CR	V
网状电容	C		齐纳二极管	D 或 VR	V
极性电容	C				
可变电容	C		滤波器	FL	Z
			熔丝	F	
			底板	J 或 P	
连接器	J 或 P		电感，扼流圈	L	
晶振	Y	B	集成电路	U、IC	
			绝缘跨接线	W 或 P	
延迟线	DL		电池	BT	
			仪表，仪器	M	

（续）

元器件	ANSI/IEEE	IEC
插头，阳极连接器	P	
电源	PS	
测试点	TP	
跨接线	W、P或R	
微处理器	U	
振荡器	Y（晶振）或G（其他）	G
继电器	K	
电阻器	R	
封装	R	
网状电阻	R	
电位器	R	
可变电阻	R	

元器件	ANSI/IEEE	IEC
热电偶	RT	
变阻器		
不对称的	D或CR	
对称的	RV	
插座	X、XAR、XU、XQ等	
开关	S	
测试点或引脚	TP	V
晶体管	Q	
变压器	T	
电压调节器	VR	
天线、放电器、屏蔽罩	E	
衰减器	AT	
发动机、风扇、同步	B	

图3-2为一个典型的原理图及其基本部件。图中的每一个元器件都由一个符号表示，并附有相应的参照名称。电路图中的电子元器件如无特别说明，通常采用下列单位

电容器 = 数值大于或等于1的用皮法（pF）表示

= 数值小于1的用微法（μF）表示

电阻器 = 用欧姆（Ω）表示

多年以来，绘制原理图的原则有了进一步的发展。主要的原则包括以下方面：

1）在图纸上，信号的流向是由左至右的，左边输入，右边输出；

2）在图纸上，每一页中的电位（电压）应该由底部到顶部增大。例如，在图3-2中，+12V在顶部，-12V在底部；

3）在同一个集成电路封装中的各个单元，习惯上使用统一的序号进行标识。例如，U1内部的门，可通过在其后加后缀字母来表示，如U1A、U1B等。所有这些相同的门只有一个需要显示电源连接。电源连接通常被省略，但是为了使图表更完整，最好保留以做提醒。

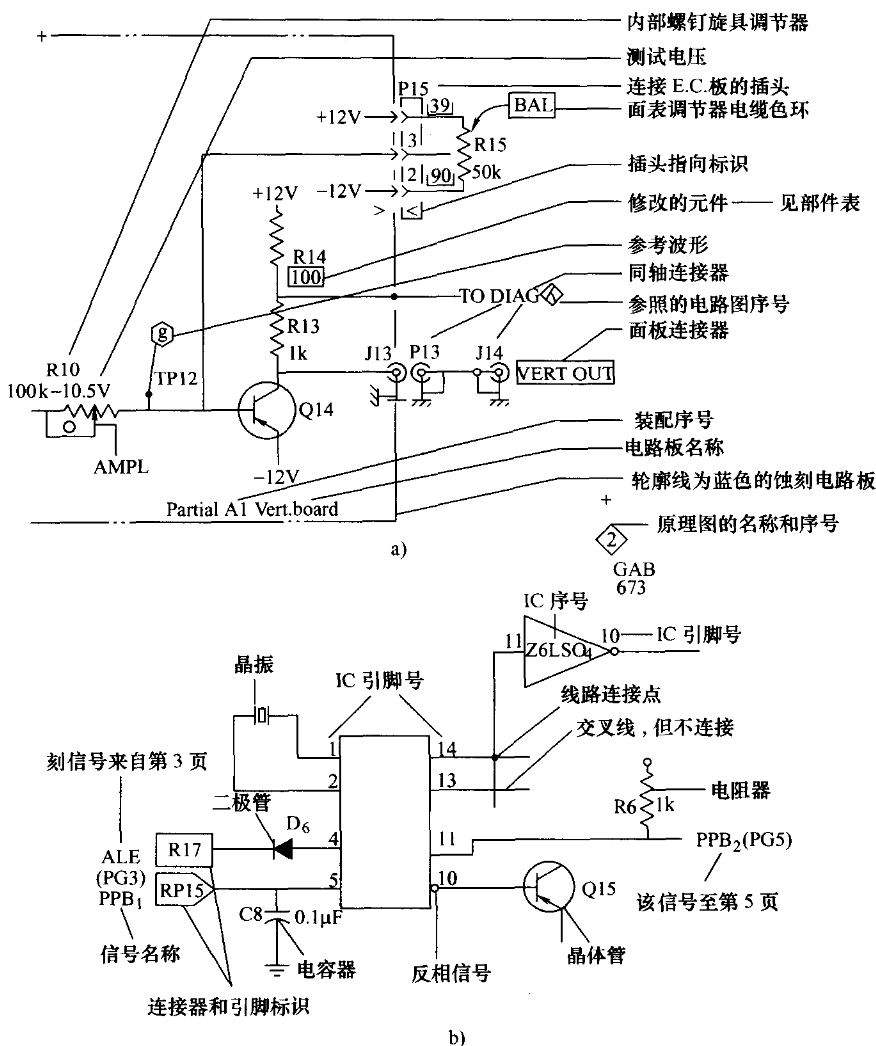


图 3-2 采用 ANSI 规定符号的电路原理图

a）分立元器件图示 b）集成电路图示

3.2 印制电路板的设计总则

印制电路板最基本的功能是为电路元器件提供支撑，并完成各个元器件之间的电气连接。为了达到这些目的，就产生了各种类型的印制导线。不同的印制电路板在基材（层压板）、导线类型、板层数、硬度等方面的选取各不相同。

因此，希望印制电路的设计者们要非常熟悉这些差异，并熟知它们的影响，包括在成本、元器件放置、导线密度、交付周期和功能表现方面的影响。最初的设计总是会比成品要完美，选材也比成品要好。制作过程最好能够完全按照设计来做，印制电路板也是如此。因此，有必要形成设计和布局的方法和程序，这显得尤为重要。

设计以及布局包括了整个系统硬件的各个方面，不仅包括最终形成的印制电路，而且包括其中的每一个元器件。在设计和布局时，必须考虑到整个系统中元器件之间的位置关系、相互之间的影响以及装配问题。

版面设计是印制电路板设计中的一个非常重要的方面。多数情况下，设计者们都会低估完成一项任务所需要的时间和精力，这就会耽搁产品的启动时间，并可能在产品的使用中产生很多不可预知的消耗（Ross 和 Leonida，1996d）。

机械、电子、功能和环境等方面的技术要求，都可能会对电子设备的设计产生影响。

机械设计要求包括尺寸、形状和重量，元器件安装的位置和所需的装配公差、屏蔽、设备标识。

电气设计要求注意参数的选择，例如电路功能和导线分布，元器件的额定电气参数、尺寸、允许误差以及内部和外部的相互连接等。

功能设计要求包括可靠性、可维护性、可用性和人性化设计（显示、控制方面）。

环境的设计要考虑到下列因素：机械震动、极限温度、盐雾和真菌防护层以及在太空和水下操作时的要求。

所有上述的各种因素并不一定都是印制电路板所固有的要求，但是经过精心的设计、恰当的选材和制造技术，就很可能很好地满足上述要求。在设计印制电路板，包括多基板的设计过程中，要考虑到以下这些因素，其中很多因素都会对印制电路板的设计造成一定的影响。

3.2.1 几个重要的设计因素

由设备设计者提供给印制电路板设计者的设计输入称为设计因素，包括：

1）电路类型（模拟电路或数字电路等）；

2）板面尺寸；

3）板层数；

4）焊盘形状尺寸；

5）孔尺寸；

6）层的厚度；

7）板的厚度；

8）外部连接；

9）安装孔；

10）电源和地层的厚度；

11）元器件的详细说明。

3.2.2　几个重要的性能参数

分别为：

1）抗拉强度；

2）抗弯强度；

3）震动与振荡；

4）热击和温度周期变化；

5）耐湿性；

6）抗霉性；

7）盐雾；

8）弯曲或扭曲；

9）介质击穿电压；

10）焊接性和重焊性；

11）绝缘电阻（表层和整体）；

12）耐火度；

13）导体温度上升；

14）机械加工性；

15）更高层次的考虑。

3.3　机械设计中的注意事项

3.3.1　印制电路板的类型

在常用的印制电路板类型中，版面设计应注意的事项详细说明如下：

1）单面板：在成本要求较低的情况下通常使用这种类型的面板。在版面设计时，有时需要元器件或使用跨接线来跳过电路板的走线。如果数量太多，就应考虑使用双面板。

2）双面板：双面板可以使用也可以不使用 PTH。因为 PTH 板的价格昂贵，当电路的复杂度和密度需要时才会使用。

在版面设计中，元器件面的导线数量必须保持最少，以确保容易获得所需用材。

在 PTH 板中，镀通孔仅用于电气连接而不用于元器件的安装。出于经济和可靠性方面的考虑，孔的数量应保持在最低限度。

要选择单面板还是双面板，很重要的一点，要考虑到元器件的表面面积（C），它与印制电路板的总面积（S）之比为一个适当的恒定比例，这对于元器件的安装是有用的。值得注意的是，“S”通常指的是面板一面的面积。表 3-2 列出了最常用的印制电路板的 S：C 的比率范围。

表 3-2 印制电路板面积与元器件面积之比（Leonida，1989）

面板类型	单面 PTH 板	双面 PTH 板
分立元器件（集成电路不超过总面积的 5%）	2～3	1.5～2
混合的（集成电路占 35%～50%）	2.5～4	2～3
集成电路板（分立元器件不超过 20%）	4～6	2～3

可以把表 3-2 中列出的数值作为设计准则，它仅仅为导线宽度、焊盘直径、最小剩余空间等的选择提供了一个标准。

一般情况下，选择单面板还是双面板必须满足最有效的成本利用。根据经验，带有镀通孔的双面印制板的造价是单面板的 5～10 倍之多。同样，装配元器件的成本也是一个需要考虑的重要方面，装配一个单面印制电路板的元器件（手工）所需的费用大约是电路板成本的 25%～50%，而装配一个带有 PTH 的双面印制电路板的元器件，所需费用则为其成本的 15%～30%。

印制电路板不仅提供了机械支持，而且还对安装在它上面的元器件起到了连接作用。因此，对于印制电路板的设计者来说，有必要了解面板的整个物理尺寸（外框尺寸）、安装孔的位置、高度限制和相关的详细资料。以下就是印制电路板机械设计中主要要考虑的因素：

1）适合于印制电路板制作的最佳面板尺寸；

2）面板安装孔、支架、夹板、夹子、屏蔽盒和散热器的位置；

3）对于较重元器件合适的固定装置；

4）元器件安装的合适孔径；

5）装配好的电路板在运输过程中要具有抗压性和抗震性；

6）电路板的装配方式（垂直安装/水平安装）；

7）冷却方式；

8）元器件特殊的放置要求，类似于在前面板上操作的元器件，例如：按钮、变阻器等。

3.3.1.1 元器件面积的决定因素

面板上的元器件面积等于各个元器件面积之和，每一个元器件都要考虑它在面板上正面放置时的面积。元器件的尺寸可根据制造商所提供的元器件目录来获得，也可通过对这些元器件进行实际测量而得到。

元器件被看作是简单的几何形状，例如，一个 DIP 封装的集成电路就是一个矩形，轴线元器件也可用矩形来表示。当然，由于轴向元器件是水平安装的，在所表示的矩形图中，它的直径为宽，它本身的长度再加上两端引脚的长度为其长。同样地，一个 TO-18 型的晶体管可用圆形来表示。

要在印制板上安装的各个部分要在部件清单中详细地记录下来，每部分都应该标有特有的参考名称和对它的简要说明。例如，一个电阻器，可由 R1 表示，对它的说明是 1/4W 的碳膜电阻器。在安装过程中，对其有用的任何附加信息都可以列入这张清单中，例如硬件装置、部件的隔离、连接器覆盖物或者任何其他没有在原理图中表示出来的材料。部分制造商提供了数据单，以供电路设计者为电路选择部件时参考。对于印制电路板的设计，这些数据单中还应包括部件的物理尺寸。

3.3.1.2　体积计算

一些设备可能必须适合于一个固定的空间，这就会限制面板的尺寸，或是必须让设计者只能从少量可选的面板尺寸中做出选择。多数情况下，设备的印制电路板的尺寸和数量都是受其外观设计制约的。例如，对于一个呼叫系统接受器来说，所使用的面板必须非常小，因为这个接受器需要放在衣袋中。同样的，可植入的电子心脏起搏器所使用的面板也是非常小的，因为它要植入到体内。除非对使用的空间有强制性的要求，否则，安装空间或设备外壳的大小就要符合系统的需求，这样就可以避免把全部系统都强塞入一定空间之内，而不得不使用非标准或非最佳尺寸的电路板的情况发生。因而，对于一个电子装置的可用体积计算就要谨慎一些。与实际的体积相比，更重要的是要知道面板在最糟的情况下可占用的最大体积，包括安全误差在内。

3.3.1.3　可调节元器件要易于触及

可调节的元器件，通常指变阻器，它在许多印制电路板中都是经常用到的。在印制板上安装这些元器件时，应该使其容易触及，以便于调节。

3.3.1.4　元器件的水平安装或垂直安装

轴向元器件既可以水平安装，也可以垂直安装，垂直安装轴向元器件所需要的面积较小，因此可使印制电路板的面积较小。当然，这种技术也有一定的缺点，例如可靠性较低，在元器件样式和手工安装方面会增加一定的难度。除此之外，增加的导线密度也会限制组装密度。因此，垂直安装方式，只有在面积有限、体积有限的情况下，或者当面板中的一些元器件的高度高于轴向元器件时才适用。

3.3.1.5　面板尺寸

具有某一个功能的印制电路板本身并不是一件产品，它总是要通过与外部的种种联系来获得电源、交换信息或显示结果。可能需要把它放入到一个盒中

或将它滑入到一条支架来实施它的功能，电路板上有些地方可能对高度有限制。出于装配或制造的目的，在面板上可能需要一些加工孔和外围区域。在面板设计之前，所有这些因素都要被确定，包括面板的最大尺寸和连接器、显示部分、安装支架等的位置或任何其他外部特征。

为了避免不同印制电路板之间通过终端、电缆或连接器相互连接，最好把所有电路都安置在一块电路板上。多数情况下，这种安装方法会造成不适用的大型电路板，需要更多的空间用于相互连接，从而造成更多功能的干扰。另一方面，使用过多的小型面板来构成一个完整的电路，除了一些外部相连部分以及连接器所带来的不可靠性外，也会使成本偏高。一般说来，由几个小型电路板组成的设备或系统，由于它有模块式结构和便于分离信号的流通路径，所以它是比较容易进行维护的。

在电路板布局的时候，最好留出5% ~10%的面积以供可能需要的修改，但是这种修改通常是在原形或成批生产阶段完成的。当最终产品的物理形状设计确定时，电路板的布局最好应已完成，且应与所需的外形和尺寸相匹配。

当设计电路板的大小时，应考虑以下元器件安装的定位要求：

1）连接器或连接舌片；

2）固定物或固定的区域；

3）控制或调节装置，例如开关和电位器。

除了这些之外，还有安装孔及其周围的安全区域也是需要考虑的。这样，印制电路板的净区域可以从总的区域中计算出来，此时，要考虑到以下几何图形的规格限制：

1）定位孔（装配时使用）：理想的直径是3.175mm，它们的位置通常是靠近电路板最长的一边，并与此最长边留出尽可能宽的距离。它们的中心距电路板边缘至少是孔径的1.5倍，且不少于2mm，其周围的安全区域应该是一个圆形。

2）安装孔：在固定的安装孔周围需要留出安全区域，同时也要注意垫圈和螺钉的大小，除非使用的是绝缘垫圈。

3）边线：通常沿着各边线要留出2 ~5mm的安全区域，这一点很重要，因为面板的焊缝会造成铜板区域的分层太靠近边线。

虽然理想的电路板既不能太大也不能太小，但是对于面板的尺寸，通常也不可能给出一个全球通用的应用标准。当然，在工业应用中，通常采用的支架的尺寸为19in，很明显，印制电路板的尺寸应当遵循这个标准。标准电路板的尺寸可允许插件间的互换，可以规定空白原型板、框架、固定装置和模块的生产标准，以供封装系统时用。对于标准印制电路板的尺寸，不同的组织机构给出了一定的提议。例如，表3-3中给出的DIN标准（德国标准化组织）已被广

泛接受，特别是在欧洲国家。

表 3-3　PCB 的尺寸标准

前部	印制电路板			
高	高	长	长	长
132.5	100	100	160	220
177.0	144.5	100	160	220
221.4	188.9	100	160	220
265.9	233.4	100	160	220

IBM 个人计算机和它的克隆品意味着 IBM 板卡和它的半板卡的尺寸已经成为此项工业标准。建议使用的面板尺寸比所有单个板子尺寸中最大的要小。

常用的面板尺寸为 460mm×610mm。这里依然遵循一个尺寸标准：例如

1=60mm、2=120mm、3=180mm、4=240mm

纵向的，依次是 A=80mm、B=170mm、C=260mm，D=350mm。

一些因素影响电路板尺寸和形状的选择，因此，最终的选择是在众多相互冲突的因素中采取折衷而得到的。

3.3.1.6　尺寸和公差

所有电路板的外形尺寸的表示都必须包含一定的公差，最常用的公差为 +0.25mm和 +0.50mm。公差是很重要的，因为需要计算出实际工作的电路板面积的最小尺寸。

在元器件非常密集的电路板上，导线/走线的公差特别重要，走线必须控制在距离板边 1mm 之内。当走线距离电路板边缘只有 0.50mm 时便很难设计了，所以公差就显得更加重要了。当切割电路板的轮廓时，这条走线也可能会受到损害。

尺寸的公差能够减少制造成本。在一块大的面板上加工许多小型的面板，生产周期的最后一步是将它们分割开，这是很普遍的做法，这种方法同样也用于多层板的制造。如果公差很大，就会毫不费力地制造出更多带有小的独立电路的较大面板，这将带来可观的制造成本的减少。

最终的电路板的尺寸会影响其造价。电路板的周边必须要留出 25mm 的区域供加工孔使用。电路板的最终尺寸必须要有一定限度，以便获得更好的效益，因为每个标准覆铜板的尺寸通常是以 24in×36in 为基础的，并按 1ft 的倍数增加。这种设计将带来更少的浪费和更低的成本。

3.3.1.7　电路的分割

使相互连接点的数量最小化有助于决定电路板的尺寸。不同的分割方法会造成连接点数量的很大差别，因而需要一个合理的分割方法。通常根据电路的原理图来决定分割点，以达到最少的连接点，从而可以确定印制电路板的尺寸。

把元器件置于一块还是更多电路板上，要根据电路板可用的形状、一些部件的功能模块和维护需求来决定。从整个所需印制电路板的情况来看，虽然使用一块电路板通常会更经济，但是把电路板分割成2块或更多的小板，也具有一些优势，那就是：便于版面布局设计、制造检测和维护。

尽管具有这些优势，但现代的数字电路的复杂性也会导致大量较大电路板的使用，尤其是对于一些专业用电路板，它们包括多层面板。几年前，专业用的PTH板的最大尺寸约为200mm×250mm，而现在，最常用的尺寸约为400mm×500mm。一部分原因很可能是由于计算机数控机床（CNC）（主要用于PCB打孔和元器件的插入）的使用，这种机器在610×610mm的大面积上可实现高精度定位（精确到25μm）。

从上面的情况，可很清楚地了解到，电路板的尺寸必须采取折衷的处理方式，除非它要被嵌入到一个预先决定好了的空间内，或预先设计好了的框架内，那样，尺寸就不是最重要的了，只需解决封装密度和所使用的连接器的型号问题就可以了。

3.3.2　印制电路板的装配技术

很多技术都可以用于把印制电路板安装到底盘上或下一个装配场中。为了具有好的机械稳定性，印制电路板至少三边都应留有25mm的空位以供支撑之用。通常情况下，0.031in和0.062in（0.785mm和1.57mm）厚的电路板应至少每隔10cm有一个支撑点。对于印制电路板装配技术的选择需要参考下列因素：

1）印制电路板的尺寸和形状；
2）输入/输出终端；
3）印制电路板的移动需求；
4）散热要求；
5）屏蔽罩要求；
6）装配硬件的类型；
7）有效的设备空间；
8）电路类型以及与其他电路间的关系。

3.3.3　印制电路板的安装与固定

插入式印制电路装配使用的最便捷的方式是插件导轨，通过扩展卡槽的方法为设备以外电路板的测试提供了便捷的快速拆/装方式，插件导轨的类型取决于电路板的形状和安装定位的精确程度。图3-3是几种常用的插件导轨。在电路板的边缘，必须留有足够的空间安装插件导轨。图3-3a中，立柱作为一个导轨

使电路板慢慢地插入连接器，然后用夹板将其固定，从图 3-3b 中可见，这种简单的装置适用于任何尺寸的电路板，如想节约空间，还可将其安装于容器的四壁，图 3-3c 中，Z 字形条可被调换，以适应各种面板尺寸，图 3-3d 中，虽然没有实际的固定装置，但电路板能被快速地取出和替换。

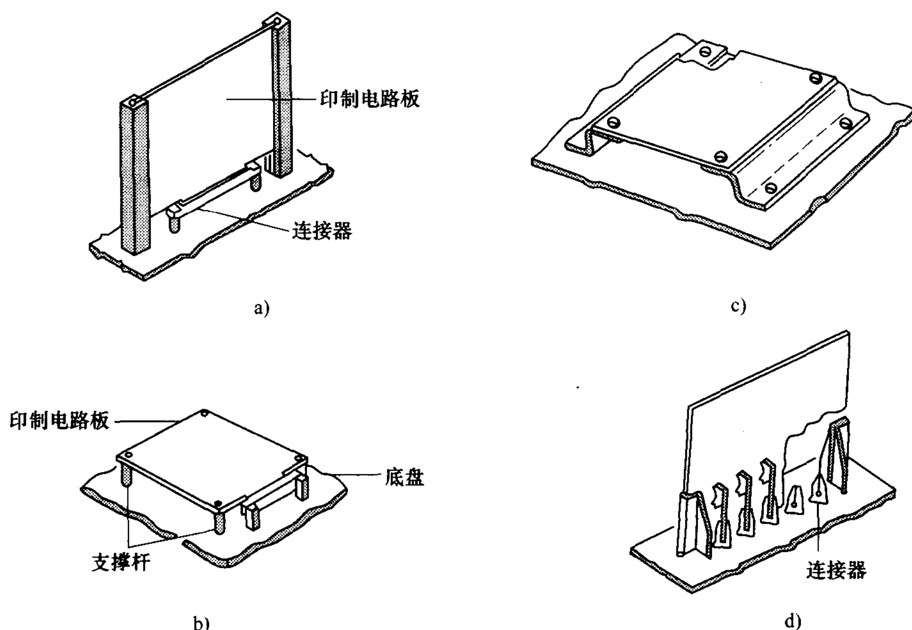


图 3-3　使用插件导轨安装电路板的方法（Lindsey，1985）
a）带有凹槽的立柱和有角度的夹板　b）Z 字形支架
c）安装于带螺纹的支撑杆上　d）金属片支撑导轨

如果电路板的连接处不需要连接器，也没有可用的插件导轨，那么电路板上就要有安装孔，以便能用螺钉、支架、或其他的机械夹具将其固定。当然，要留有足够的空间，以便元器件或导线不会混乱或与安装设备发生短路。此外，还要为所有的引脚、电线、部件等提供足够的空间（1.5～2.5mm），以确保穿过印制板非元器件面的引脚突出不会与邻近的电路板发生短路。对于超大或超厚的电路板，要留有足够的空间，以确保电路板在震动时不会由于板子的柔性而引起引脚短路。

在印制板上要使用加固物以确保在机械压力下面板仍能保持平坦，把电路板安装在一个框架中或使用加固物就可以解决这个问题，这些设备也可以避免电路板在波峰焊接或回流焊接中可能产生的弯曲。图 3-4 为常用加固物的类型。

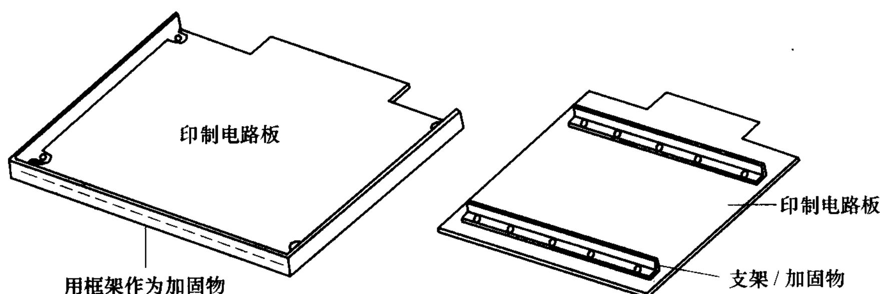


图 3-4 使用加固物来固定印制电路板

3.3.4 输入/输出接口

在印制电路板和相关设备之间进行电气连接最常用的方法是使用连接器、接口终端和电缆。对于任何特定的电路板，使用何种连接方式通常在设备的机械设计过程中就已经决定了。最常用的连接方式是连接器，而这些连接器也有多种不同的类型。单体印制电路连接器是最常用的类型，其中一端可作为电路板的插座，电路板的一边有印制好的铜箔可以作为连接点，只需要把该边插入连接器即可。单体（single part）印制电路连接器的另外一端是塑料插座，通常用作电路板装配中对应的连接。

双体连接器本身就具有插头和插座多种连接形式，通常，插头安装在印制电路板上，插座则作为电路板的底座或支撑面。

单体或双体连接器接触器的数量通常是有限的，并且安装的方向一般也是有规定的。而这些局限性可以通过使用分立的连接器来克服。

3.3.5 印制电路板的插拔

人们可运用多种技术来插拔印制电路板，而这种技术也造成了各种各样插拔工具的发展。这些工具的基本的要求是必须利用最小的面板空间，因此，即使电路板的数量增多，使用插拔工具也不会对电路板、元器件和连接器造成任何损坏。最常用的插拔面板的工具是钩形的，指孔形的和有拉环形的。

3.3.6 测试与维修

由于产品的复杂性、所用元器件的质量和制造方法的问题，最终装配好的电路板可能会有一部分无法使用，因此，设计电路板时必须要考虑能否对其进行测试，并使测试越简单越好。

小一些的电路板更容易进行有效地测试和维修。在较大的电路板上，想要把有问题的部分隔离就很困难，因为通常不可能把该部分与信号源断开或不影响信号的传输。如果把一个完整的电路分布在不同的小型电路板上，就很容易将有问题的电路分出，从而对它进行维修或用一个好的电路板将其替换掉。把一个完整的电路分布在不同的子电路板上的另一个好处是，人们可以把相同的子单元，如电源，用在其他设备上。

3.3.7 机械应力

相比较而言，如果在尺寸小于 100mm × 150mm、标准厚度为 1.6mm 的小型电路板上装配常用的电子元器件，那么在机械应力方面，几乎不会引起任何问题。如使用较大、较薄的电路板，或者在电路板上安装像变压器等较重的元器件时，就需要注意了。作为一般的指导原则，较重的部分应该安装在支撑设备附近，如插件导轨、连接器或固定物。

3.3.8 印制电路板的厚度

无论是印制导线还是多层传导层，对于它们最佳厚度的选择都没有一个标准。有时，对印制导线厚度的限制可由电路板的最小孔径决定，尤其是当这些孔是镀通孔时。

最终印制电路板的厚度取决于传导层的数量和设计中对于电气层的层与层之间间隔的要求。在多层印制电路板中，成本的增加并不是和传导层数量的增加成正比的。例如，把印制电路板的层数由 4 层翻一番为 8 层，成本大概只增加 30%。当然，如果传导层的数量超过 10，那么多余层数的成本则会以很快的比例增加。

印制电路板的厚度可以从 0.50 ~ 6.5mm 不等，但大多数刚性电路板厚度为 1.5mm。

3.3.9 几个重要的规范和标准

进行电路板设计时，必须遵循专门的互连标准中所规定的相关详细原则和建议。“ANSI/IPC2221 常规设计” 标准给出了常规结构设计的准则，也可用于材料的选择。此外，成品刚性印制电路板的性能要求在 IPC-6012 中已给出。

在设计过程中，必须很好地理解设计原则，这些原则在有关的制造、检测和质量方面的出版物中也已给出。因而，现代的印制电路板设计者必须要了解印制电路板的制造和装配过程。

3.4 电气设计中的注意事项

3.4.1 导线尺寸

通常，导线的尺寸由以下因素决定：

1）元器件的封装密度；

2）导线与元器件间的最小间距；

3）元器件几何外形的限制。

前面已经提到，通常情况下，印制电路板导线的载流能力经常被忽略，这是由于导线的宽度比要承载电流所需要的大得多。然而，随着封装密度的增加和更多的散热问题，导线的宽度必须被具体确定或至少要根据所需要的载流能力加以限制。

在大多数电子电路中，电流通常都比较小，因而导线的电阻几乎被忽略不计。但是，当涉及到电源线和地线时，特别是对于高速信号或是在数字电路中，必须在电源线和地线间使用比所需要的电阻宽得多的导线。导线的宽度决定了其载流能力，因此，必须了解影响选择合适导线宽度的因素。显而易见，当导线很长或当电压的变化率要求严格时，导线的电阻就是一个值得考虑的问题。

3.4.2 阻抗

印制电路板上的印制铜线有一个限定的电阻，该电阻引起的电压降与流经这个特殊导线的电流成正比。导线的电阻可以看作是一个具有矩形横截面的金属片，其电阻值与铜的电阻率有关，铜的电阻率在20℃时为 $1.724\times10^{-6}\Omega\cdot$ cm㊀。了解1mm宽的铜线，其每厘米长的电阻值是很有用的，可以采用标准的 $35\mu m$ 厚的铜箔（不含任何镀层）。

$$R=\rho L/A(\Omega)$$

式中，ρ 为电阻系数（$\Omega\cdot cm\times10^{-6}$㊁）；$L$ 为导线长度（cm）；A 为导线横截面的面积（cm^2）。

$$\rho(\text{铜})=1.724\times10^{-6}(\text{在}20℃\text{时})$$

$$L=1cm$$

$$A=35\times10^{-4}\times0.1cm^2$$

㊀ 本书此处有误，20℃时铜的电阻率应为 $1.67\times10^{-6}\Omega\cdot cm$，且 $1\Omega\cdot cm=10^{-2}\Omega\cdot cm$。需要指出的是，此误在本书其他章节也时有发生，译者不再一一指出。——译者注

㊁ 本书此处有误，$\Omega\cdot cm$ 后面不应该跟"$\times10^{-6}$"。——译者注

$$R = 1.724 \times 10^{-6} \times 1 = 35 \times 10^{-4} \times 0.1$$
$$= 0.0049(\Omega) \approx 0.005(\Omega) = 5(m\Omega)$$ [1]

从以上的结果可以看出，1mm 宽、标准的 35μm 厚的铜箔，1cm 长度的电阻为 5mΩ。同样的，0.5mm 宽、10cm 长的导线，电阻则为 5×10×2=100mΩ，因为线宽减半，电阻要翻倍。需要注意的是材料的电阻系数在 20℃ 时的值，它会随温度的升高而增大。

表 3-4 列出了一些电路中常用材料的电阻率。

表 3-4　一些常用材料的电阻率 [2]

材料	$\rho/\Omega \cdot cm$	材料	$\rho/\Omega \cdot cm$
银	1.6×10^{-6}	镍	43×10^{-6}
铜	1.8×10^{-6}	玻璃	5×10^{13}
铝	3.0×10^{-6}	石英	10^{17}

铜的电阻率 ρ 为

$$\rho = 1.78 \times 10^{-6}\Omega \cdot cm, \text{温度为 } 25℃。$$

0.3mm 宽、35μm 厚、500mm 长的铜线电阻（25℃）为

$$R = 17.8 \times 10^{-3} \times L/A$$

式中，R 用 Ω 表示；长与宽用 mm 表示；厚度用 μm 表示。

$$R = 17.8 \times 500/0.3 \times 35 \times 1000 = 17.8/0.3 \times 35 \times 2 = 0.85(\Omega)$$

众所周知，当电流流过一根导线时，由于焦耳效应，导线的温度会升高，随着温度的升高，导线的电阻会增加。由于焦耳效应或任何由元器件散发的热量都可能会造成导线温度升高，因此，有必要对 20℃ 时导线的电阻值进行修正。电子设备中的温度各不相同，工作温度可能会达到 60℃ 或更高，这会明显地增加导线的电阻，这一点在设计过程中必须要考虑到。众所周知

$$R_t = R_0[1 + \alpha(T_1 - T_0)]$$

式中，R_t 为在温度为 T_1 时的电阻；R_0 为在温度为 T_0 时的电阻；α 为温度传导系数。

举例说明，假设一个电子设备的内部温度为 80℃，外部温度为 20℃，铜的温度系数为 +0.0039，则 0.5mm 宽、10cm 长（电阻为 100Ω）的导线电阻应为

---

[1] 本书此处有误，“$R=\rho L$”应改为“$R=\rho L/A$”。即 $R = \dfrac{1.724 \times 10^{-6} \times 1}{35 \times 10^{-4} \times 0.1} = 0.0049\ (\Omega) \approx 0.005\ (\Omega) = 5\ (m\Omega)$

[2] 本书此处有误，表 3-4 中“P”应改为“ρ”。此外，译者对表中与正文中的 ρ 进行了单位统一，故表中“ρ”的数据与本书原文此表中的数据差了一个“10^{-6}”的倍数。最后，需要指出的是，表中电阻率似有误，20℃ 时，银、铜、铝、镍、玻璃及石英的电阻率分别为 $159 \times 10^{-8}\Omega \cdot m$、$1.67 \times 10^{-8}\Omega \cdot m$、$2.66 \times 10^{-8}\Omega \cdot m$、$6.8 \times 10^{-8}\Omega \cdot m$、$10^{10} \sim 10^{14}\Omega \cdot m$ 和 $7.5 \times 10^{17}\Omega \cdot m$，译者建议读者在阅读时自行订正。——译者注

$$R_t = 100[1 + 0.0039(80 - 20)]$$
$$= 100[1 + 0.0039 \times 60] = 123.4(\mathrm{m \cdot \Omega})$$ ㊀

从这个结果中可看出，电阻值增加了23.4%。

所有载流导线的温度都要升高，而且该值比根据所承载的电流、导线的宽度和铜的厚度而计算出的温度还要高。

铜线的厚度、工作温度以及所需承载的电流量，这些数据都为设计者选择合适的线宽提供了指导原则。由此可以知道给定导线的载流能力或可以确定承载一定电流所需的导线宽度，这两种情况都必须考虑上升的最高温度。通常，当该温度达到40℃（72℉）时，就需要强迫通风冷却设备，而当设备的温度为10℃或15℃（18℉或27℉）时则无需强迫通风（见图3-5）。

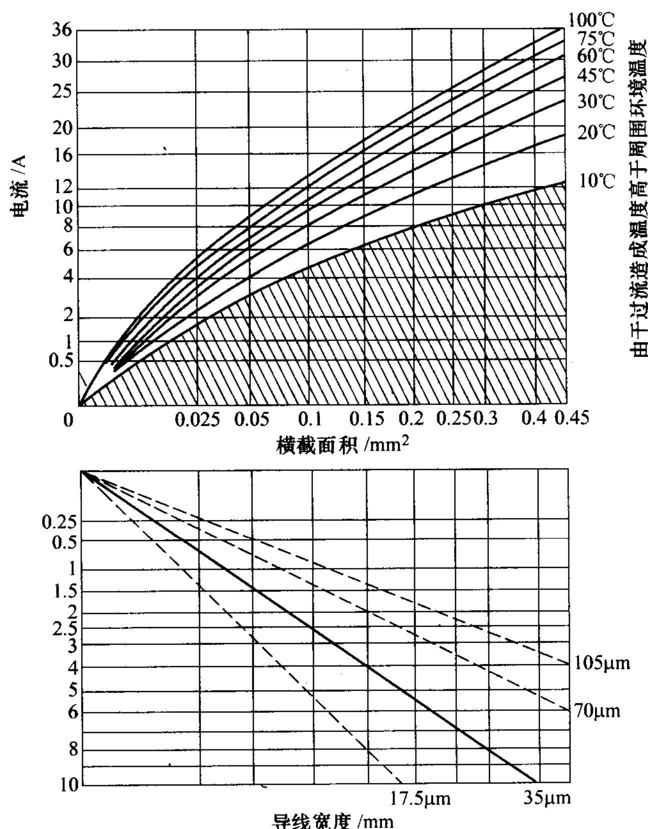


图3-5　处于安全工作温度的导线宽度

㊀ 本书此处有误，应改为 $R_t = 100[1 + 0.039(80 - 20)] = 100(1 + 0.039 \times 60) = 123.4(\Omega)$。——译者注

举例说明，在高出周围空间温度 30℃时，如果一个 35μm 的覆铜板要传导 8A 的电流，则导线的最小宽度决定如下：

1）在左上部的刻度线找到 8A；

2）顺着 8A 的横向线与 30℃的曲线相交；

3）从交点处垂直向下与 35μm 的铜箔厚度曲线相交；

4）从该交点向左画一条水平线，就可以得到导线的最小宽度为 2.6mm。

在所有要求严格的情况下，导线横截面的面积应该通过使用最不理想情况下的值来计算。对于印制板的导线宽度，如果宽度小于 0.5mm，那么制造的公差应该高达 30%；如果宽度在 0.5～1.0mm 之间，那么制造的公差应是 20%；如果宽度大于 1.0mm，则制造的公差应是 10%。

对于导线电阻的确定，可参照图 3-6 中的列线图。根据导线的宽度（左边的直线）和铜箔的厚度（中间的直线），就可以在右边的直线中得到单位长度导线的电阻。反过来，如果单位长度导线的电阻已知，在铜箔厚度已知的情况下，可用列线图来求得导线的宽度。同样地，在已知导线宽度的情况下，也可求得铜箔的厚度。

表 3-5 中列出了推荐使用的导线的最大载流能力。

表 3-5　导线的最大载流能力

导线宽度/in	电流/A			
	1/2oz	1oz	2oz	3oz
0.005	0.13	0.50	0.70	1.00
0.010	0.50	0.80	1.40	1.90
0.020	0.70	1.40	2.20	3.00
0.030	1.00	1.90	3.00	4.00
0.050	1.50	2.50	4.00	5.50
0.070	2.00	3.50	5.00	7.00
0.100	2.50	4.00	7.00	9.00
0.150	3.50	5.50	9.00	13.00
0.200	4.00	6.00	11.00	14.00

注：英寸与毫米的转换关系：1in = 25.3994mm。

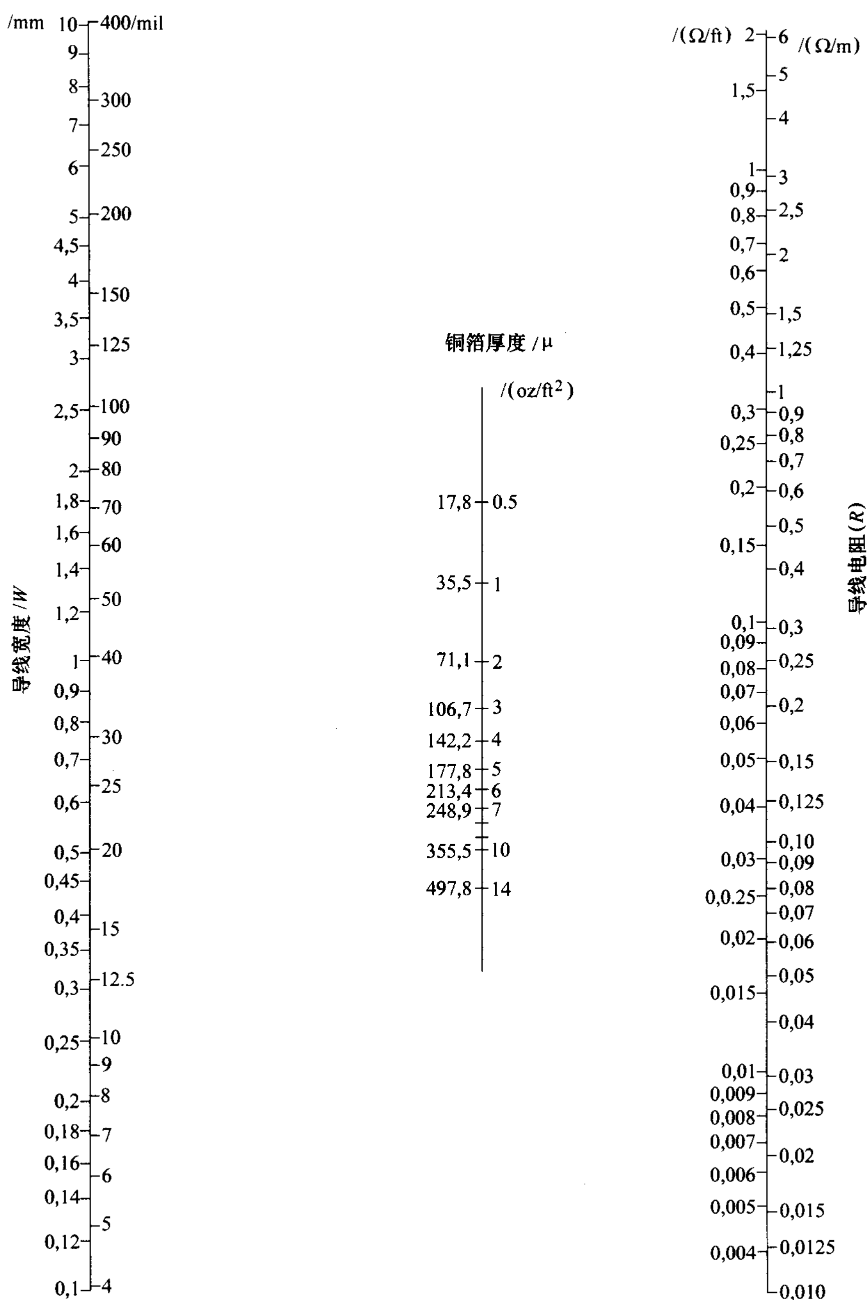


图 3-6　根据导线的宽度和铜箔厚度来确定印制电路板导线电阻的列线图

注：刻度都是对数的（经 Leonida 同意重绘，1989）

3.4.3　印制电路板导线间的电容

电容是一个重要的参数，设计高频印制电路板时尤其值得注意。在下列两种情形中容易产生电容：

1）在电路板两面的导线之间；

2）在相邻的导线之间。

在电路板两面的导线之间产生电容：两条印制电路板导线被电介质隔开，一条在上一块条下（见图 3-7），这样就形成一个电容器，它的近似电容量可由基本的电容公式计算出来

$$C = 0.886 \times \varepsilon \times A/b(\mathrm{pF})$$

式中，A 为总的重叠面积（cm^2）；b 为电介质的厚度（mm）；ε 为相关的介电常数，该值一般由印制电路板层压板的制造商提供。

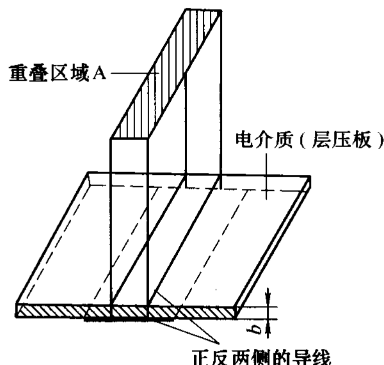


图 3-7　被电介质隔开的两条导线间的电容（导线在印制电路板的正反两侧）

值得注意的是，由这个公式得到的仅是近似值。不过，当导线宽度至少为电介质隔离层的 10 倍时，这个值基本等于经验值。导线间的电容耦合可通过限定在同一个垂直平面的导线的长度而使其减至最小。

为了减少快速开关电路中电源线和地线中尖峰信号的数量，建议把这些线准确地布设在印制电路板的正反两面，电源线和地线通过电路板形成一个分布的去耦电容。在印制电路板上的 TTL 电路会在电源线中形成很窄的电流尖峰信号，该电流可通过去耦电容放掉，而不影响电源的电压。

相邻导线间的电容：它是导线的宽度、厚度、导线间距以及电路板材料的介电常数的函数。介电常数为 5.4 的 G-10 层压板和厚度为 35μm 的导线形成的耦合电容值（pF/cm）如图 3-8 所示，该值可用于所有的实际应用。

举例说明实际应用，假设有两条 1mm 宽、100mm 长的平行导线，它们的间距为 1mm，由图可知它们的耦合电容为 0.4pF/cm，因而它们的全部有效电容为 $0.4 \times 10 = 4\mathrm{pF}$。

相邻导线间的耦合电容通常是不希望出现的。因此，就要找出合适的方法来使之最小化。以下的预防方法就有助于将耦合电容减小 3 ~ 10 倍。

1）保持重要的导线之间的间距，在它们之间留出足够的间距。

2）如果有可能，可以在重要的导线间布设一条地线，地线越宽，效果越好。

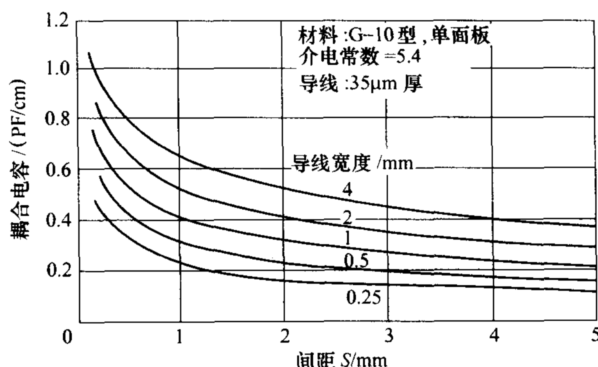


图 3-8 相邻导线间的耦合电容是导线间距的函数

3）在布设地线的地方，两条信号导线应尽可能地靠近地线，这可使地与地之间的电容耦合高一些，同时使信号线间的耦合小一些。

对于重要的高频电路来说，由环氧玻璃或环氧纸制成的单面电路的电性能是不能满足要求的，相关的接地面必须使用微带线结构。用双面印制线达到传输线性能的方法称为“微带”。

3.4.4 印制电路板导线的电感

对于快速信号或高速逻辑电路中导线模式的设计，电感耦合也是一个要主要考虑的因素。当逻辑电路中时钟的频率工作仅为10kHz时，使用矩形信号的高频元器件时常会产生一些问题。因此，在这种情况下，了解导线布设会产生的电感是很重要的。

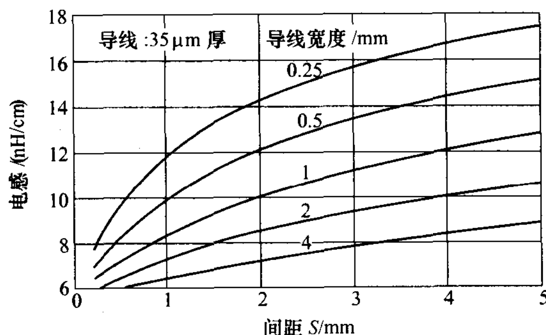


图 3-9 平行导线之间的电感

（经 Bosshart 同意重绘，1983）

导体电感的计算是一个相当复杂的过程。对于一个已知型号且铜线厚度为35μm的覆铜板，不同宽度的平行导线之间的电感可参照图3-9计算得出。

3.4.5 高的电应力

印制电路板相互连接密度的增加，要求设计者应进一步减少传导部分的间距和尺寸，例如走线、PTH的直径、焊盘面积等。集成度的增加自然伴随着电路板电应力的增加。很明显，借助于电应力的水平、周围的环境、产生的热量

和机械压力，电应力（几 kV/mm）能够开启老化的机械设备（Travi 等人，1996）。因此，为了保持电应力在一个合适的水平，以达到绝缘可靠性方面的要求，设计者必须为绝缘体提供足够的距离，这个距离可能比所希望的最经济的距离还要大。

3.5 导线的模式

印制电路板的可生产性和可靠性在很大程度上取决于印制电路板的基本设计，包括导线宽度、厚度、间距、形状和设计路线等。设计可手工完成，也可通过计算机完成。但是不论哪种方法，布局设计都必须遵循以下三个基本原则：

1）元器件间互不干扰；

2）导线不能彼此交叉；

3）任何两个相邻导线间应有足够的间距。

一般规则是，每个孔只可放入一根引脚，并且每根引脚必须穿入一个孔。无论这个连接点制作的多好，都不能与另一个引脚再焊接在一起。轴向元器件通常有两根与元器件轴线平行的引脚，当然也有例外。

3.6 元器件的布局规则

下列是元器件的布局规则：

1）在高敏感电路中，首先要放置重要的元器件，这样，就可使重要的导线满足最小长度的要求。

2）在不是很重要的电路中，元器件要准确地按照信号传输的顺序布局，这可使整个电路总的导线长度达到最小。

3）在电路中，如果一些元器件与其他元器件相比有更多的连接点，则首先要放置这些主要元器件，其余的元器件则置于其周围。

4）一般原则是先放置那些位置固定的、相互连接的元器件，如连接器、散热器等，然后再放置与那些与固定元器件相连接的元器件。

5）元器件应置于 2.5mm 的栅格处。

6）在众多的元器件中，首先应放置较大的元器件，然后在它们之间的空白处再放置较小的元器件。

7）所有的元器件都应按照以上所述方式放置，以便一旦必须替换元器件时，不会干扰其他元器件。

8）元器件应成排或成列放置，达到良好的视觉效果。

3.6.1 导线的宽度和厚度

导线的宽度由以下因素决定（Ross 和 Leonida，1997）

1）元器件的封装密度；

2）导线间或元器件间的最小间距；

3）元器件的外形或扇出等几何因素。

导线的宽度主要与承载的电流以及由电阻产生的最大热量有关。细导线的电阻较高，宽导线的串联阻抗和电感很小，寄生电容也可忽略不计。因此，对于低阻抗信号，需要使用宽导线，另一方面，如果是高阻抗信号线，当寄生电容需要限制到一个较低的值的时候，可使用细导线。通常，导线应尽可能宽，

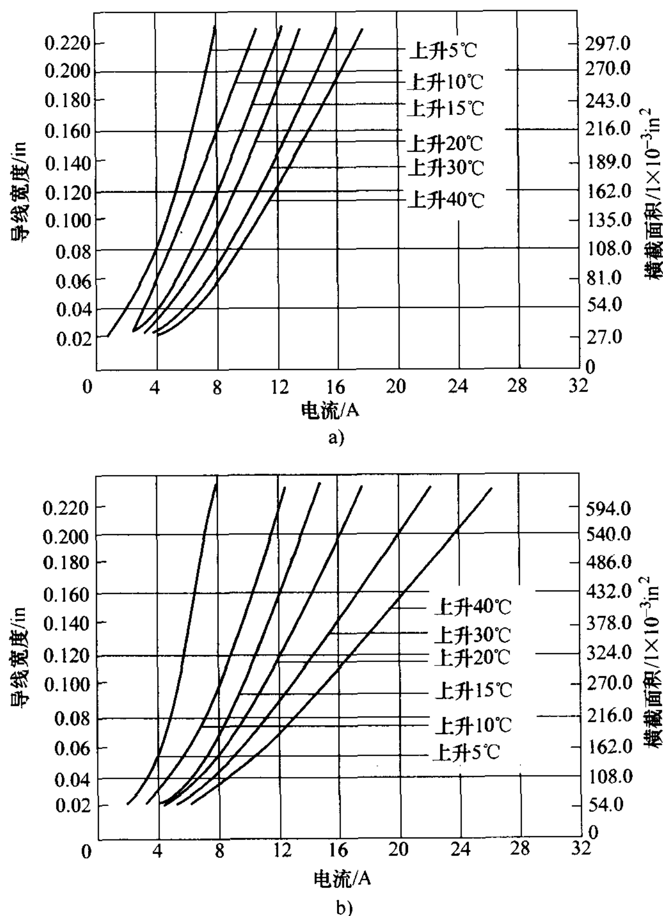


图 3-10 温度上升与电流的关系

a）1oz 铜 b）2oz 铜

以防在蚀刻过程中遇到的各种不同情况，或是在板图中造成的不可更改的划痕。图 3-10 为刚性板蚀刻铜导线的载流能力。一般地，对于 35μm 和 70μm 的粗导线，在蚀刻方式中，允许有 10% 的常规变化范围。

在制造印制电路板的化学和照相过程中，需要注意导线的最小宽度和导线间的最小间距。如果导线线宽做得比最小宽度还要小，那么当它制造出来后，很可能会开路（没有连接）。如果两根导线太靠近，比所要求的最小间距还要近，那么当它生产出来后，很可能会短路。这些规范被人们称为 *X/Y* 原则，其中 *X* 代表导线的最小宽度，*Y* 代表导线间的最小间距。例如，8/10 原则，导线的最小宽度为 8mil，导线间的最小间距为 10mil。现在常用的是 8/8 原则，其值与 2/2 原则一样小。

3.6.2　导线间距

对于导线间距的设置，通常是根据相邻导线间的击穿电压或火花放电电压来考虑的。导线的间距是由相邻导线的峰值电压、电容耦合量和使用的涂覆层决定的。对于导线间距的设计，有以下建议：

一般设计值：0.025mm，电压限定为 400V 的直流电，高密度。

首选交流电或最小峰值㊀为 0.015mm，电压限定为 50V 的直流或交流峰值。

特例最小值：0.010mm。

如果设计为首选的最小值或是特例的最小值，集成印制板必须被覆以合适的涂覆层或合适的焊接罩。

只有在没有办法避免时，才可以使用所允许的最小间距，否则还是要用较宽的间距，以使在生产过程中不合格率降到最低。

此外，在决定导线间距时还应考虑到：

1）最重要的阻抗或高频元器件应紧密地放在一起，以减少重要阶段的耽搁；

2）变压器和电感元件要单独放置，以避免耦合；

3）感应的信号路径应垂直交叉；

4）在磁场运动中移动可产生电子噪声的元器件都应该单独放置。

对于没有电气连接的任何两个引脚之间的最小距离没有具体的标准。但是，电压超过 30V 时，一般设置平均为 2mm，或者由于短路会导致电路的重要性能或昂贵的元器件损坏时，就有必要增加间距。

大多数现代电路中使用的半导体器件的工作电压通常为 24V，因此，由于导线间距窄而引起的击穿问题几乎是不存在的。但是，对于一块常规的无涂覆层

㊀ 原书此处有误，“首选交流电或最小峰值”应改为“首选最小值”。——译者注

的环氧材料的插件来说，在海拔不超过 1000m 的高度操控，导线间距应为 0.002mm/V。在更苛刻的情况下，为确保足够的安全，这个数字还应再增大。对于不同的电压，推荐使用的最小导线间距单位如表 3-6 所示。

表 3-6　建议使用的最小导线间距

导线间的直流电压或交流电压峰值/V	无涂覆层导线海拔为 0～10 000ft，遵照 IPC-ML-910A 标准	无涂覆层，海拔高于 10 000ft	有涂覆层，内层，遵照 MIL-STD-275 和 IPC-ML-910A 标准
0～15	0.015in（0.38mm）	0.025in（0.64mm）	0.005in（0.13mm）
16～30			0.010in（0.25mm）
31～50			0.015in（0.38mm）
51～100		0.060in（1.52mm）	0.020in（0.51mm）
101～150	0.025in（0.64mm）		
151～170	0.050in（1.27mm）	0.125in（3.18mm）	0.030in（0.76mm）
171～250		0.250in（6.35mm）	
250～251		0.500in（12.70mm）	
251～301	0.100in（2.54mm）		0.060in（1.52mm）
500			
500+	0.0002in/V（0.0051mm/V）	0.0010in/V（0.0030mm/V）	0.00012in/V（0.00305mm/V）

3.6.3　导线形状

布局确定以后，导线应尽可能避免出现锋利的表层和锐角的转弯，圆滑的轮廓不仅能将导线破裂、箔层脱落和电击穿的几率降到最低，而且更利于焊接。从制图的角度来看，这个过程的成本可能会比较高，但在导线弯曲处使用圆形角、导线连接处和各个终端区域更加平滑是人们所希望的。

沿直线方向的走线相对比较清晰，以直线延伸然后又以 180°返回的走线看起来就像一根天线，以直角折回的走线看上去也同样像一根天线，并且有天线的性能。但得承认，这确实不是一根很好的天线。

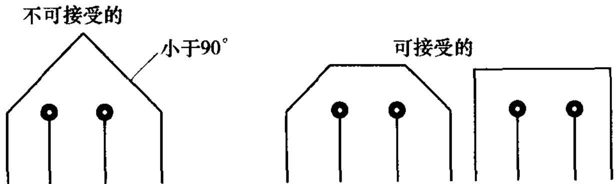


图 3-11　导线形状：不推荐使用的形状和推荐使用的形状

因此，在面板上不应有超过 45°角的信号线，并且所有走线的拐角都应该是斜接的，如图 3-11 所示。

3.6.4　导线的布线和位置

为了使电路实现无误的工作，有必要对印制导线进行合适的布局，并且要正确定位各种元器件，以使其不会造成电子或机械干扰。

ANSI/IPC-2221 中制定的导线的布线规则如下：

1）导线长度应尽可能达到最短。在简单的电路中有很多间距，导线可以任意方向布局，以使各导线具有最短的连接长度。

2）导线应避免形成锐角，以防在蚀刻中出现问题。

3）当一根或几根导线必须在焊盘或其他导电区域之间穿过时，其间距必须平均分配。

4）只有在较大间距无法达到时才可使用最小间距，否则，还是要提供较大的间距。

5）在双面印制电路板中布线，常规的方法是在元器件面走线沿 y 轴方向，在焊接面走线沿 x 轴方向。

6）走线应该最大量的分布于焊接面，并沿 x 轴方向布线。

在实际应用中，可供参考的一些其他建议：

1）线路层要控制在最少。

2）提供最大线宽和终端面积，并且要与封装密度相匹配。

3）避免使导线形成锐角和有锐角形转弯，以使产生的电路和机械问题达到最少。

4）通过对每一个电路的各个部分仔细的布线，与信号地之间的连接只提供惟一的一条导线，或者说本质上是一个点。在确定内部电路的布线时，接地电路是主要要考虑的问题。

3.6.5　电源线和地线

对于电源线和地线，主要要考虑的就是要把设备和电源直接相连。但是，这是不可能都做到的，最好的方法就是增加导线的宽度，以提供足够的电压来达到同样的效果。大家可能记得，在印制电路板上的电源线和地线并不只是导电链接。这些导线的宽度和它们的布局在电路电压的稳定性方面起到了一个重要的作用。在某些情况下，这些导线电阻的减少可能会造成电源线电压或接地的不稳定，因此，要充分认识到，在印制电路板设计中使导线具有足够的宽度，这一方法是可行的。在数字和高频信号电路中，这个问题更为突出。

在一个电路中如果用到多个电源电压，就必须确保在最不理想的情况下，

地线具有承担这些混合载荷的能力。经验证明，应根据导线的不同目的来确定它们的宽度

$$W_{地} > W_{电源} > W_{信号}$$

式中，$W_{地}$ 为地线的宽度；$W_{电源}$为电源线的宽度；$W_{信号}$为信号线的宽度。

对于 TTL 电路，其基本原则是

$$W_{地} \geqslant 2W_{电源}$$

$$W_{地} \geqslant 2W_{信号}$$

同时，对于 TTL 电路，建议将对所有未使用的板面区域用作接地面。

因此，在一个复杂的或多输入/多输出半导体封装电路的版面设计中，电压的分配或电源和接地面是一个重要的设计因素。电源线和地线通常设计为完整的金属平面。在电源线和地线的设计中，涉及的主要问题是（Braun，2002）：

1）能量损失；

2）电源和电压值的变化；

3）效率；

4）相互连接的串扰。

有关这些问题的设计规则在 ANSI/IPC-2221 中给出，它们是：

1）在同一块印制电路板上的模拟电路和数字电路应该严格地具有各自独立的接地网络，以避免能量损失。

2）所有数字信号和元器件的布局都应该远离模拟电路，所有高速数字导线应采用最直接的方法布线到数字地或电源面。

3）电源和地信号线必须有足够的宽度，从而具有低电阻和低电感，以承载所要求的电流。否则，导线的作用只能相当于一根熔丝。

4）在连接电源线和地线时，要优先考虑高功耗的元器件，以使沿着电源线的能量消耗是不断减小的。

5）电源线和地线之间的间距应尽可能的大，以避免串扰问题，例如：电流的干扰。

6）所有的输入/输出电源线和地线都应具有较小的导线长度，以在电路中产生更高的效率。

7）为了提高半导体器件压模和封装的操作速度，需要许多电源和地线输入/输出端。通常情况下，具有 40% ~60% 的电源和地线的输入/输出端的印制电路板都会有一个不错的操作速度。

8）要避免开关电源靠近模-数转换器（ADC）、数-模转换器（DAC）和模拟电路。有时候，在靠近芯片的地方使用一个独立的 5V 三端稳压器作为模拟电源是比较容易的。

9）注意电感和变压器的外部磁场。如果有必要，则要使用静电和磁屏蔽器

件，以合适的角度安装 RF 去耦扼流圈可减少互感。电源变压器不安装在电路板上，它们的外部场强最强烈的区域要尽量远离主要的模拟电路。使用环形电源变压器可减少外部磁场。

10）认真考虑在同一块印制电路板上的可编程逻辑器件（PLD）和超大规模集成电路（VLSI）芯片的位置，这些芯片时常会包括许多同步的逻辑电路，并产生很大的开关电流，而产生的这些电流可以渗入到电路板的其他部分。要确保它们通过芯片引脚很好地被旁路掉，这不仅可以保证它们的可靠工作，而且还可以减小电源线的噪声。

在一个复杂的电路中，人们希望将接地端分开，以使电路达到最佳效果。公共地可能会造成沿导线的有害电压降，产生噪声和错误的信号，导致电路故障。因此，设计者必须尽可能地减少地线的长度或增加其宽度。

为了提供足够的屏蔽，尤其是在高频屏蔽中，最好有一个接地面。在印制电路板的世界中，一个板面就是一块坚固的铜板，如果把它连接到地，它就是一个接地面；如果把它与电源电压连接，它就是一个电源面板。但是，由于通常在电源和地之间有很多旁路电容，所以电源和地对于交流信号就没有很大的差别，交流信号在电源和接地面都是可以流通的。

接地面的设置保证了一个低电感的高频回线。如果信号线靠近接地面或置于接地面中，那么彼此间的电容就可能达到最小。因此，大的接地面和小的导线间距产生的阻抗就会较低，造成的干扰也较小，也就是说，具有较高的稳定性。图 3-12 说明了在印制电路板设计中接地面的情况，通常大的剩余区域被设计为接地面。

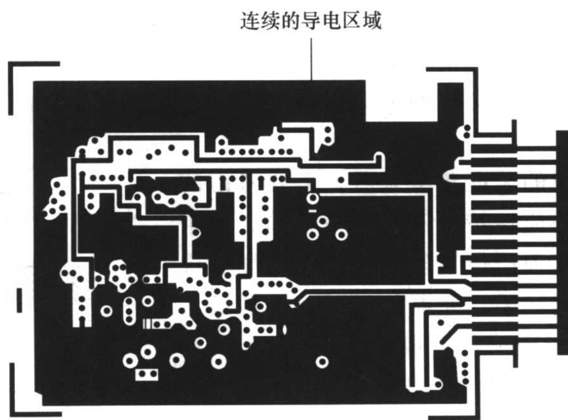


图 3-12　印制电路板设计中的接地面

3.7 安装和装配

为了达到生产最大化，成本最小化，应考虑到某些限制条件。而且，在着手设计工作之前，还应考虑到人的因素。这些因素详述如下：

1）导线间距小于 0.1mm 将无法进行蚀刻过程，因为如果蚀刻液在狭小的空间内不能有效扩散，就会导致部分金属不能被蚀刻掉。

2）如果导线宽度小于 0.1mm，在蚀刻过程中将会发生断裂和损坏。

3）焊盘尺寸比孔的尺寸至少应大 0.6mm。

以下所列限制条件决定了板面的设计方法：

1）用于产品原版胶片的翻拍照相机尺寸性能；

2）原图制表尺寸；

3）最小的或最大的电路板操作尺寸；

4）钻孔精度；

5）精良线形蚀刻设备。

在设计中，从印制电路板的装配角度来看，要考虑以下参数：

1）孔的直径要根据最大材料条件（MMC）和最小材料条件（LMC）的情况来决定。一个无支撑元器件的孔的直径应当这样选取，即从孔的 MMC 中减去引脚的 MMC，所得的差值在 0.15～0.5mm 之间。而且对于带状引脚，引脚的标称对角线和无支撑孔的内径差将不超过 0.5mm，并且不少于 0.15mm。

2）合理放置较小元器件，以使其不会被较大的元器件遮盖。

3）阻焊剂的厚度应不大于 0.05mm。

4）丝网印制标识不能和任何焊盘相交。

5）电路板的上半部应该与下半部一样，以达到结构对称。因为不对称的电路板可能会变弯曲。

从印制电路板的装配角度来看，需要考虑的一个重要因素就是应该特别注意在焊接前，由于插入的元器件与其理论位置发生倾斜而可能造成的短路问题。根据经验，元器件引脚允许的最大倾斜度应保持在与理论位置成 15°角以内。当孔和引脚的直径差值较大时，倾斜度最多可达到 20°。垂直安装的元器件，倾斜度可达到 25°或 30°，但这样会导致封装密度的降低。图 3-13 是 TO-18 型晶体管在不同的引脚倾斜度时的封装，

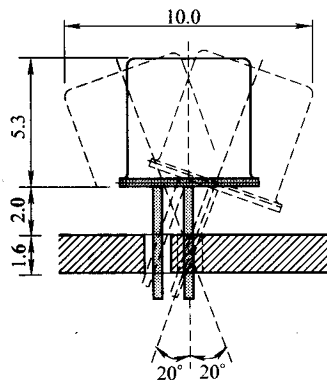


图 3-13 TO-18 型晶体管在不同的引脚倾斜度时的封装

图中，TO-18 型晶体管安装位置距印制电路板 2mm，如果孔径为 1mm，倾斜度可以达到 20°，当然引脚本身没有任何的倾斜。

多个电路板的装配方式通常可使现场维护如同将电路板拔出进行替换一样比较容易，当然，前提条件是每个独立的电路板都能行使其特有的功能，这样电路板的替换就不会有大量的拆卸，保证了最少的焊接/脱焊次数。因此，印制电路板的设计必须考虑到它的可维护性。

装配时需要的焊接技术和设备，也使电路板的设计和布局增加了许多局限性。例如，在波峰焊接中，凹槽的最大尺寸、边缘的距离和操作的空间都是其重要的因素。同时，设计者必须要尽可能地意识到最终的成品究竟应是什么样子，并要尽力保护它的最敏感部分。例如，任何高压电路都应受到保护以防止和外部的接触；产品中的电路板以及电路板上的元器件都要小心放置，以便将由外部物体所带来的损坏达到最小。

3.8　环境因素

在很大程度上，设备的可靠性取决于基本的印制电路板的可靠性。因此，人们希望印制板应能够适应环境的需要，不至于造成表面的损伤或操作性能的改变，而且，除了起到一个电子连接媒介的作用，印制电路板还要为相互连接的有源和无源元器件提供机械支持。因此，它们成为了封装或装配的主要部分，而且必须能够承受住和整个结构相关的环境所带来的压力。以下是印制电路板在设计当中应注意的主要环境因素。

3.8.1　散热问题

印制电路板设计者应注意以下几点来确保电子装置的适当的冷却：

1）尽可能地使用高温元器件；

2）将对温度敏感的元器件与高散热源隔开；

3）保证适当的导体的冷却，可通过以下三种传热方式作到降温，如热传导，对流和辐射。

热传导散热通过以下途径来实现：

1）使用高导热性的材料；

2）采用到散热器的距离最短；

3）在传导路径的各部分间，确保良好的热连接；

4）在热传播的路径中设置尽可能大的印制导体。

对流降温可通过以下内容实现：

1）增加表面面积使热量传播；

2）用扰流代替层流以增加热传播效率，确保所需降温部分周围环境得到很好的清理。

增加辐射散热可运用：

1）使用具有高散发和吸收性的材料；

2）增加辐射体的温度；

3）降低吸收体的温度；

4）通过几何设计使辐射体本身的反射达到最小。

为了清除局部会损坏电路板或相邻元器件的热点，特别要注意功率晶体管或大功率电阻的布局。一般地，这些元器件应安装在散热器的框架附近。

为了使元器件保持在最高工作温度以下，还要做到：

1）分析电路，了解每个元器件的最大功耗；

2）确定所希望的元器件最高表面工作温度，可允许的最高温度取决于元器件本身以及绝缘环境。把这些因素记在心中，就能做出很好的设计。

3.8.2　防尘与防污染

印制电路板必须要防尘、防污、防污染、防潮、防盐雾和防机械损伤。有很多绝缘物质可应用于保护层，常用的有聚氨酯、硅、丙烯酸、聚苯乙烯和油漆。以下是对于保护层的选择方面提供的可供参考的技术因素：

1）能抗腐蚀并能对电路板起到保护作用；

2）有韧性——能在震动时防止断裂；

3）易使用、易加工处理；

4）透明性——能看到电路板中元器件的标识；

5）便于移动以修理印制线路——合适的厚度可对保护层重要的电子性能，如耗散因素、介电常数的影响达到最小。

对于军用印制电路板的保护层，其厚度要遵照 MIL-I-46058 的规定。对于普通应用，厚度一般为 0.075～0.25mm。

3.8.3　防冲击与防震动

震动、弯曲和变形是较大型电路板常遇到的问题。对于震动和弯曲等影响，可采用与其他任何形式的工程中所遇到类似问题时完全相同的方法来解决。有些部件容易受震动或变化的影响，应该将它们放置于尽可能靠近电路板有支撑物的地方，用螺钉或吊带将元器件固定在其位置上。

由于震动或弯曲常会导致的问题之一就是有电元器件可能会带电与毗邻板背面的焊接点相接触，为了避免这种情况的发生，可以在电路板合适的位置上装一个比任何元器件都高的隔离装置。

电路板的设计要适应震动的需要，然而为了维护方便，对电路板的设计也有一定的要求（IPC2221-p. 27/28）。大型的或较重的元器件需要特别注意，除非它们有很多的引脚，否则还是有必要用某种装置把它们固定在电路板上，如图 3-14 所示。

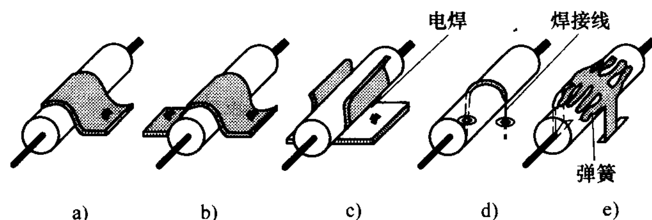


图 3-14 把较重元器件固定到电路板上的常用方法

a）单面夹 b）双面夹 c）电焊夹 d）利用焊接线固定 e）用有带子的弹簧固定

在印制电路板的设计中，要注意到下列指导原则，以消除由于震动而导致的印制电路板装配的失败：

1）不依靠任何支撑物的元器件的安装高度应保持在最低限度的高度；

2）当电路板要适应震动时，任何元器件每个引脚的支撑力超过 5g 时就考虑支撑问题；

3）在实际的应用中，部件的安装中要考虑使用震动隔离器；

4）为减小电路板的偏离，电路板应安装加固物和/或金属芯。

如果安装印制电路板的设备要受到冲击、震动等因素的影响，那么引脚就很容易从单面印制电路板的焊盘中脱出。防止这种问题发生的方法之一就是增加焊盘面积以适应较大的元器件，或者，建议使用两个虚拟焊盘，如图 3-15 所示。如果一个焊盘与电路板脱离，那么就能够很容易地把元器件焊接到虚拟焊盘上而得以修复。还有一个更好的方法就是在安装较重元器件时，在孔洞中使用一个漏斗形孔眼，这种方法可对连接于印制电路板的引脚产生一个较大的机械阻力，以防止震动。



图 3-15 使用模拟焊盘的方式修复电路板

a）较重元器件 b）焊盘与电路板脱离

3.9 散热需求与封装密度

3.9.1 散热器

散热处理是印制电路板设计中的一个重要方面。在应用集成电路的系统中，设计者应该注意热量的分布和散热问题。例如，有 SMT 的电路，元器件密度通常比较高，每平方英寸的印制电路板上就会有较大的功率耗散，而且，由于元器件的间距小，强迫通风冷却的效率也会较低。因此，设计时必须考虑要有很好地空气流通，以便有大量的空气流动，使电路板的温度升高控制在允许的范围之内。除非特别注意热量的处理，否则电路的可靠性就会降低。例如，在多基板中，所有的内部互连都可以放在内层，厚的散热器、固体铜或其他的材料则可被放在外层，元器件可以直接安装在金属表层。

为了有效地散热，散热器周围应该留有足够的自由空间。在散热器附近不要放置体积大的元器件，因为这些大型元器件可能会阻碍空气的自由流通。通常地，产生热量的元器件会被置于离电路板较高的地方，这样，既可防止元器件受到损害，也可防止印制电路板本身受到损坏。在一块垂直安装的印制电器板上，两个散热器不应被设计并安装为一个在另一个上方。为了确保单向槽散热器中最大的热量交换，空气的流动必须总保持与散热器中槽的方向相同。

3.9.2 封装密度

没有一个简单的公式可用来计算印制电路板最适宜的封装密度，例如，如果密度非常低，那么就需要使用较大面积的印制电路板或较多数量的印制电路板来实现相同的电路。但这会导致要使用更多的设备，更多的连接器和导线，从而在电路运行中会产生更多的寄生效应，因此，在提高成本的同时也会降低可靠性。另一方面，非常高的封装密度将会使电路温度较高、串扰增加，不便于维修和维护，还可能会导致印制电路板的不合格率增加。这种方法同样既会降低可靠性也会增加成本。

封装密度通常要遵循以下要求：

1）设备的目的、用途和应用——是固定安装，还是便携式，亦或是机载。

2）热量的产生和冷却——自然空气流通，强迫冷却或是密封装置。

3）印制电路板上的元器件类型。

4）元器件技术——是分立的，小规模集成电路，大规模集成电路，超大规模集成电路，还是 SMT。

5）使用印制电路板的类型（互连密度）——是单面板，双面板，还是多基

板。

当使用双面板不能提供足够的元器件密度时，最好使用多基板。例如，在双面板中，通常使用的最大值是 2.0 TO 封装，每平方英寸可增加到 3 以上。在一些设计中，使用多基板的元器件密度可达到双面板的两倍，而丝毫不用增加相互连接的数量。

根据一般的设计原则，印制电路板的封装密度可根据印制电路板可使用面积中每平方英寸上元器件的安装孔的数量来估算。单面板为 3 ~ 10 孔/in^2，双面板为 10 ~ 20 孔/in^2，而多基板则超过 20 孔/in^2。

封装密度主要由以下因素决定：

1）印制电路板的轮廓、尺寸和形式；

2）印制电路板最后要安装的空间的类型；

3）机械附加装置的方式，如插件导轨，无需支架等；

4）输入/输出终端，如连接器的类型、缆线等；

5）支撑程度，如保持力和扣紧等；

6）插件移动需求，如用插件抽出器或特殊的抽出工具来帮助印制电路板从安装处取出；

7）对可调节元器件所期望的接近程度；

8）散热需求；

9）屏蔽要求，例如，电路与其他电路和环境的兼容性；

10）电路的类型和它与其他电路的关系，例如放置的位置和区域要求；

11）环境要求，如震动、湿度、喷雾盐、灰尘和辐射等；

12）制造要求，如制造成本和场地。

3.9.3　封装形式与物理属性

每一个电子系统都是由各种各样的部件组成的，如电子元器件、接口、电子存储媒介和印制电路板等。这些系统的复杂性也被反映在使用元器件的类型和它们的接口结构上。

元器件通常有以下几种类型：

1）轴向引脚元器件；

2）径向引脚元器件；

3）SMD；

4）机电元器件。

1. 轴向引脚元器件

这是最常用的元器件类型。包括电阻器、一些类型的电容器和二极管。对于这些元器件的安装，可将其引脚弯曲大约 90°，并插入到印制电路板的焊盘孔

中，然后进行焊接即可。两个引脚间的距离由元器件自身的长度、引脚直径和引脚弯曲部分的长度决定。如果轴向元器件需要垂直安装，可将一个引脚像发夹一样弯曲至垂直位置，并且通常会加装一个套管以起到绝缘的作用。

2. 径向引脚元器件

这种元器件的引脚和它们的主体垂直，包括一些类型的电容器、各种电阻器、类似于集成电路的有源元器件、晶体管以及一些机电类元器件如开关、继电器、连接器等。TO 封装的晶体管通常要焊接于一组焊盘上（见图 3-16），集成电路通常会安装在底座上，它们的引脚可以插在底座的插孔内。双列直插封装（DIP）是最常用的集成电路封装形式，标准的 DIP 封装有 8、14、16、20、24、28、40 和 64 引脚，它们有两排引脚，每排中引脚间距为 2.5mm，两排引脚间的间距为 7.5/10/15mm。

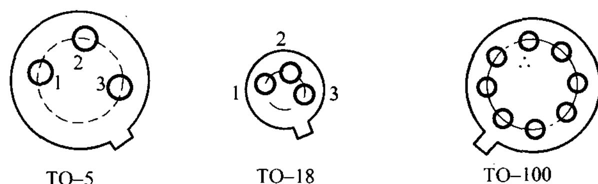


图 3-16 TO-100/TO-5/TO-18 的引脚图

轴向和径向元器件都属于穿孔元器件的类型，因为它们要将引脚穿入钻孔以达到机械固定的目的，并把引脚焊接于焊盘来保证电气连接。

元器件的复杂性是根据它们所拥有的输入/输出端的数量来确定的。元器件越复杂，与之互连的基板也就越复杂。

许多外围引脚和下一级的输入/输出计算设备，例如存储器和逻辑器件等，正在被更换为表面阵列封装形式，如 BGA 或细密距 BGA。

3. 表面贴装技术（SMT）

SMD 具有扁平表面的引脚，这些引脚被焊接到叫做焊盘的焊接垫上。元器件被放置于电路板表面，而不是插入其中。当今的 SMT 已经进步到了这样一个阶段，生产的大多数电子元器件只能采用 SMT 形式。

4. BGA 封装

阵列封装，例如 BGA 和细密距 BGA，是现在最新技术的元器件封装类型，用于如存储器、处理器和现场可编程逻辑阵列（FPGA）等输入/输出设备。球形和圆柱形的栅格阵列在 1992 年设定了其引脚间距标准，为 1.5、1.27 和 1.0mm。细密距 BGA 封装的引脚间距标准为 0.8、0.75、0.65、0.5mm。表面阵列封装在整体的设计中有其固有的标准。对于高性能的 BGA，其信号输入/输出数量大约是普通手持产品中所用 BGA 的 2.5 倍。BGA 封装对于高频印制电路板的设计来说更加有用。

5. 机电元器件

这种元器件包括继电器、变压器、连接器等。通常，它们的引脚结构不会有任何特殊的模式，但是却有标准的栅格表面变压器除外。

3.10　版面设计

印制电路的版面基本上是这样一个图样，在基板上绘出印制线、所有电子和机械元器件的物理尺寸和位置，以及连接各个电子元器件的导线路径。实际上，在准备原图布局之前，必须掌握有关印制电路板布局的所有信息。因此，版面设计者必须熟悉设计理念、电路的详细情况和设备后的基本原理。

在印制电路板版面中的各个元器件和连接线路的设计都来源于电路图，由设计者设定位置和路径以达最佳结果。印制电路板的版面布局确定了电路最终的物理形式和外形，在布局完成时，设备详细信息的标注也就完成了。

为了确保设计出了一个不错的版面，电路设计者必须提供给印制电路板设计者以下信息内容：

1）一幅精心绘制的原理图，其中交叉线和环线的数量做到最少；

2）电路不相容区域，如一条电路需要与另一条电路隔开；

3）在系统互连中使用的外部连接点的数量和位置，它对决定输入、输出和接地端的位置起到了重要的作用；

4）在原理图中，电路板的连接应该用数字或字母标明，以便能够容易并正确的识别；

5）清楚的标明屏蔽和地，尤其是当它们用于减少耦合干扰或噪声的情况下。

以上这些问题在小公司不会发生，因为那里的工程师既是电路设计者，也是印制电路板设计者，同时还负责着产品生产的整个过程。

版面设计是复杂的工作，因为必须要考虑不同的要求和约束。对于一个好的版面设计来说，一般要考虑到：

1）产品类型（所要求的质量、可靠性和安全性、应用标准、所需的正式批文等）；

2）所期望的产品体积；

3）具有所希望的自动化程度的装配设备和技术；

4）维护机构（工厂为前提，支付的维护设备和顾客的维护点）；

5）工作环境（存储、震动和振荡）；

6）运输安排；

7）电子方面的考虑/约束，例如电磁屏蔽、导线间的串扰；

8）需要便于接触的元器件/连接的模块；

9）散热问题；

10）印制电路板或在印制电路板上安装的元器件和装配中任何其他的金属部分间的绝缘要求。

版面设计完成后，可能还会有许多原因要把电路的一部分分开，例如散热问题、电磁屏蔽、装配技术类型、便于成型产品的操作、可维护性等。在这些情况下，建议安排高质量的工程师来从事这些方面的设计。

在过去，版面设计是一项非常重要和专业的工作，因为它是用手工来完成的，它对印制电路板制作需要的时间和成本有很大的影响。计算机辅助设计（CAD）系统的广泛使用以及硬件和 CAD 软件的发展使相关的版面设计只涉及到了几个特殊领域，如注意电流承载量的大小、散热设计等方面。

3.10.1 网格显示系统

网格显示系统通常用于印制电路板版面设计的实践过程中。网格纸一般是成卷的或是标准的纸张尺寸。标准的网格间距是 8×8 或 $10\times10in^2$，每一英寸的分割都用粗线标出。使用网格纸进行设计可节约大量的时间，例如，制造元器件时把它们的引脚插入网格的交叉点，从而可以很容易地完成数控钻孔。而且，在网格纸上很容易隔离开电路的主要部分，同样也可以很容易完成次要部分的修正。

网格显示系统是设计的基础，并且也不会产生公差。当印制电路板是个别的尺寸时，则不需要使用网格。在样图中，必须标明网格增量。网格增量的选择，对于穿孔元器件来说，要以元器件的终端位置为基础；对于表面安装元器件来说，要以元器件的中心为基础。

3.10.2 版面比例

版面比例的选择要取决于所需的精确度。可以是 1:1、2:1 甚至可以是 4:1。根据原图规划版面布局图时，最好与原图使用相同的比例，这样做可以使可能出现的问题最小化，也容易对最终的版面布局进行检测。

通常使用的版面/原图的比例是 2:1，这可以兼顾所要达到的精确度和操作的便捷性。大家可能还记得，选择 2:1 的比例，原图为实际的印制电路板面积的 4 倍；而选择 4:1 的比例，则为印制电路板面积的 16 倍，这适用于需要高精度的特殊情况。

如果版面按照 2:1 的比例，那么一个网格单位将是 5mm。当网格系统以 2.5mm 为单位显得太粗糙时，则应该采用 1mm 的网格单位。图 3-17a 是 DIP 在版面中的绘制。

3.10.3 版面草图设计

印制电路的版面草图是描述各种元器件和相互连接导线的版面设计的最终图形表示，它也为最后的原图的准备提供了充分的信息。此外，版面草图还包括关于元器件孔、导线宽度、导线间最小间距等信息。

在设计者开始对印制电路板的设计进行版面规划之前，建议要准备一个试行的版面，并考虑到以下因素：

1）印制电路板的尺寸——由设备的空间大小决定或使用标准设计尺寸；

2）元器件外形——可从数据手册中获得；

3）元器件的安装数据——如果是专业的安装，就要参考数据手册，热量的限制需要使用散热器或大容量的去耦电容器；

4）相互连接图形；

5）导线宽度和间距——取决于导线的功能需要；

6）边缘线——一般是在每个边留出 0.5cm；

7）连接器——连接器的尺寸和类型取决于外部连接，如电源输入和输出信号、接地和设备要求等；

8）固定装置——螺钉，夹子等。

版面设计总是一个试验性的和查错的过程，有许多反复。在最终的设计规范确定，并以此为样本制作原图之前，要进行多次试验性的版面绘制。准备版面设计时，要以网格间距为基础，自行给各个符号指定空间。当然，对于那些各式各样的符号来说，已经建立了一定的基本规范。图 3-17b 为在网格上布局的元器件。

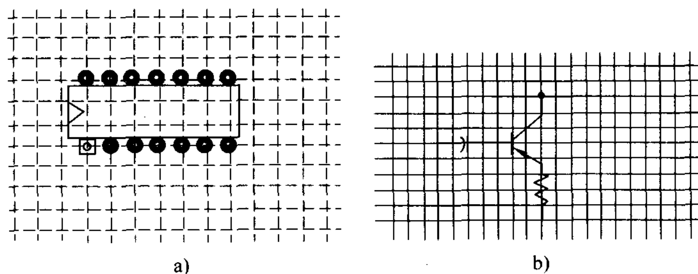


图 3-17　在网格上绘制的 DIP 及分立元器件在网格上的绘制
a）在网格上绘制的 DIP　b）离散元器件在网格上的绘制

3.10.4　版面设计注意事项

印制电路板上的所有孔和焊盘都必须根据基准体系进行排列，这在多基板中尤为重要，因为在制造过程中，每一个层面都必须和其他层面对齐。典型的基准体系如图3-18所示，它使用的是两个关联的图形、一个基准或一条参考线，以及专业的关联/基准标志，所有元器件的布局都基于这些标志。必须考虑到下列因素：

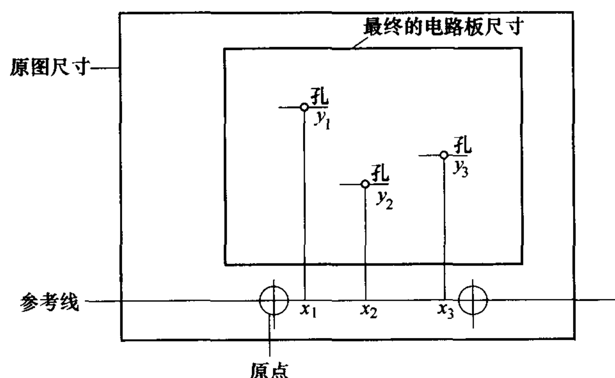


图3-18　印制电路板的基准和参考线

1）确定0/0基准点的位置，以便全部的或大部分的印制电路板的位置都处于正的笛卡尔坐标区域内。

2）确定大多数部件的空间位置，并且设定原图的网格。确定所有不适于在图中标注的部件（这种不相适应是由米制的和以英寸为基本单位的混合使用而造成的），其代码参考CAD库。

3）对于制造和装配方面，要考虑加工孔的位置要求。如果印制电路板的尺寸和/或密度禁止在其内部加工孔，则嵌入带有外部加工孔的面板，把其作为设计的一部分。

3.10.5　设计所需的材料和辅助工具

手工版面设计所需的材料和辅助工具如下所示：

1）网格纸；

2）铅笔；

3）橡皮；

4）刻度尺；

5）胶带；

6）参考模型；

7）模板；

8）描摹纸；

9）墨水笔（画草图的笔）。

3.10.6 焊盘要求

按照焊盘要求进行设计是为了达到最小的直径，该直径至少比焊接终端小孔凸缘的最大直径大 0.5mm。

必须按照 ANSI/IPC 2221 要求为所有的节点提供测试焊盘。节点是指两个或多个元器件之间的电气连接点。一个测试焊盘需要一个信号名（节点信号名）、与印制电路板的基准点相关的 x-y 坐标轴以及测试焊盘的坐标位置（说明测试焊盘位于印制电路板的哪一面）。需要为 SMT 提供固定装置的资料，还需要印制电路板装配布局的混合技术，以在“在电路测试固定装置”或通常被称为“钉床固定装置”的帮助下促进在电路中的可测试性。为了达到这个目的，需要：

1）专门用于探测的测试焊盘的直径应该不小于 0.9mm。

2）测试焊盘周围的空间应大于 0.6mm 而小于 5mm。如果元器件的高度大于 6.7mm，那么测试焊盘应置于该元器件 5mm 以外。

3）在距离印制电路板边缘 3mm 以内不要放置任何元器件或测试焊盘。

4）测试焊盘应放在一个网格中 2.5mm 孔的中心。如果有可能，允许使用标准探针和一个更可靠的固定装置。

5）不要依靠连接器指针的边缘来进行焊盘测试。测试探针很容易损坏镀金指针。

6）避免镀通孔-印制电路板两边的探查。把测试尖端通过孔放到印制电路板的非元器件/焊接面上。这种方式可以允许使用可靠的、较便宜的装置。

不同的孔尺寸的数量要维持在最低。表 3-7 列出了最小孔的公差范围。

表 3-7　最小的没有支撑的孔的公差范围　（单位：mm）

孔径	标准 A	标准 B	标准 C
0.10～0.8	0.15	0.10	0.05
0.81	0.20	0.15	0.10
1.61～5.0	0.30	0.20	0.15

镀通孔的纵横比对于制造商在镀通孔内进行有效电镀的能力方面有着重要的影响，同样在保证 PTH/PTV 结构的可靠性方面也很重要。当孔的尺寸小于基本电路板厚度的 1/4 时，公差应增加 0.05mm。当钻孔直径为 0.35mm 或更小时，纵横比为 4∶1 或更大时，制造者都应该使用合适的方式遮住或堵住镀通孔以防止焊料的进入。一般而言，印制电路板厚度与镀通孔间距的比率应该小于 5∶1。

3.10.7 手工布局程序

一个好的版面设计的基本要求是能够反映出最终设备的构想。虽然电路的复杂性和封装密度决定了版面的设计，但是要想开发出一个好的印制电路板版面设计，有一些一般的步骤需要注意，这些步骤是：

1）首先要对电路进行认真的设计，并准备好原理图和逻辑图。

2）对原理图、部件清单、特殊的电路需求和规则作出一个最初的估计，如果有需要，可以把这个数据和可用的电路板尺寸的物理局限性做一个粗略的比较。

3）编写一个材料清单，包括特殊的环境和性能要求的完整信息。

4）仔细研究各个元器件，了解它们在电路中的功能、对散热器的要求、地和电源的连接、特殊的宽度要求以及重要的短导线的长度。电路设计工程师必须明确重要电路设计的注意事项，如电容耦合、反馈、电流和时钟信号组，以便于版面设计。

5）了解信号输入和输出连接器的相互连接，以及各个不同功能器件的逻辑结构。

6）考虑公司/组织使用的设计惯例，包括元器件矩阵位置参数、机械硬件和自动元器件嵌入要求。

7）选择电路板的形状和尺寸，以协调所有的元器件，并使所有的元器件都安置到可用的空间区域内。

8）从元器件面出发来准备一个印制电路板的版面设计。双面板的设计可能通过译码体系在一张单独的纸上完成，或者也可以放在两张纸上完成，每一张纸上都是单独一个面的设计，这种方法有时会造成两个面的对准错误。多基板的导线布局往往也不采用这种方式。

9）尽可能按照信号传输的方向来设计版面，这样可能使相互连接达到最短。

10）首先要放置那些需要置于特殊位置的元器件。其中包括连接器、开关、发光二极管（LED）、安装孔、散热器或其他任何安装于仪器表面的装置。

11）然后安装比较大的元器件，在它们之间的空间内填充较小的元器件。较重的元器件应安装在有支撑的区域上或其附近。

12）找到用来紧固或安装的方法，如插件导轨、螺钉、固定器等。

13）需要输入/输出连接器的元器件被安排在连接器附近。

14）所有的元器件都要以这样的方式安装，即如果它们必须要被替换时，其他的元器件无需被脱焊。

15）把电路分成各个功能子单元。每一个子单元都应该安排在电路板的一

个确定的区域内，这样就可以确保电路板功能的可靠性，使之容易进行测试和快速的维护。

16）找到关于导线宽度、导线间距和终端区域的专业资料。

17）获得下列资料：

① 元器件的尺寸和形状；

② 元器件间的距离；

③ 元器件引脚末端的方式；

④ 电气连接的类型；

⑤ 导线最合适的或最重要的路径；

⑥ 孔的尺寸和位置。

18）所有的封装，即晶体管和集成电路应该以单轴模式安装，例如它们应以同样的方向安装，或者是垂直的，或者是水平的。这样会使印制电路板的装配和检查更容易一些。统一的方向在决定导线路径的时候会使发生错误的几率尽量降至最低。

19）所有区分引脚极性的极性元器件的放置（如二极管、电解电容）应该具有相同的方向，还要用一个方形的焊盘标出元器件引脚的正极。

20）在元器件都安放到位后，下一步就要布设电源线和地线。在集成电路中，装有牢固的电源和地线是非常必要的，每一根电源线都要使用宽导线连接于电源干线。电源线的每部分都要避免蛇形或菊链线路，这一点是非常重要的。

21）只在网格线上绘制导线，这样可使导线间的间距一致。所有的元器件孔的位置和安装孔都应放在网格体系中。基本模块单元要沿着 x 和 y 轴放置，并基于 0.1、0.05 和 0.025” 的网格体系。

22）绘制电路最初布局的草图，以便确定元器件和导线在实际制作中的准确位置。

23）当放置元器件时，要认真考虑以使线路长度达到最短，并要做到把相互连接的部件相邻放置。这项工作做好了，导线的布设也就变得容易多了。

24）把草图/版面图转化为网格体系。在网格体系中建立导线路径、元器件、孔、检测点和所有其他部分。应从元器件面来考虑版面的设计。

25）在模板网格体系中，把所有孔都放置在最佳位置上。

26）为每一个版面提供合适的制作标识孔的位置，建议最好有 2～3 个标识孔。

27）当元器件、接线端、极性和连接器的连接在原理图中出现时，都应在版面中标明。对于二极管、极性电容器和电源终端都必须标明极性，这些极性和识别标记要尽可能小，以便不被蚀刻掉，依然能够清晰辨认。如果有可能，

文档资料中元器件的参考名称标识应该与装配联系起来。在 DIP 和 TO-5 型集成电路上，引脚 1 应该总是被标明的。

28）除此之外，印制电路板装配序列号和公司标识应该在元器件面标明，把诸如产品名称或公司名称最好放在电路板的最上层。

29）版面绘制完成之后，就要着手布线原图的制作了，可由手工完成也可以通过计算机来完成。对布线原图要进行比例放大，通常采用 2×1 或 4×1 放大，然后进行照相缩印，得到一个 1×1 的正片或负片（照相原图），这是制造印制电路板的一个工具。

3.10.8 版面设计方法

1. 通过元器件设计版面草图

这种版面设计过程首先是标识出电路板的轮廓和连接器，然后草绘出元器件的轮廓，其中要有连接点和导线图形。因为版面的设计是以试验和查错为基础的，所以就很有必要对错误的地方不断的擦除以纠正。

现在又有了更好的方法，就是在网格纸上使用一张透明的描摹纸，这样可以擦除得更干净、更方便。

2. 通过模具设计版面草图

标准的元器件模板或模具是设计者在印制电路设计中使用的最重要的工具之一。模具是独立的硬模切割板，对于常用的电子元器件来说，有透明的版面图形，它们附有粘结剂，以便能把它们粘贴在光滑的草图底片上。模具的使用不仅能够节约宝贵的时间，而且也能确保恰当选取标准的元器件引脚间距和主体尺寸。

为了进一步进行版面设计，在一张网格纸上放一张描摹纸，通过使用每个元器件各自的模具就可以完成元器件的布局了。对于互连部分，可在元器件布局的基础上放一张描摹纸，用铅笔将导线在描摹纸上绘出。通过移动可以简单地改变模具的位置，把它们放在新的、最佳的位置上。当所有的元器件都放置好、所有的互连部分都画好后，元器件的引脚孔和轮廓线也在描图纸上绘制出来，版面设计就算完成了。

3.11 版面设计清单

完成印制电路板的版面设计后，建议再认真检查一遍以确保所有的要求都已达到标准。通常，这些要求可能都是很特殊的。下面列出了设计过程中涉及到的一般问题。

3.11.1　总体规划

在作总体规划时，需要提出以下问题：

1）对于平稳的信号传输，已经对电路进行了分析，并把它们分解成各个逻辑部分了吗？

2）在整个印制电路板上，是否恰当的分布了元器件，以能够使用一个一致的封装密度？

3）元器件的位置是否对重要的引脚造成短路或隔离？

4）可能需要替换的元器件是不是便于接触到？

5）自由空间是不是有利于电路扩展或修正？

6）电路板的尺寸是不是最佳的？

7）无论在那里，是否都使用了最佳的导线宽度和间距？

8）是否使用了最佳的焊盘和孔的尺寸？

9）热敏感元器件与产生热量的元器件间的距离是否足够的远？

10）是否在必要的地方安装了散热器？

11）是否有自由的空气流过散热器？

12）跨接线的使用是否达到了最小？

13）最外面的导线与印制电路板的边缘是否留出了足够的距离？

14）可以接触到可调节性元器件（微调电容器、预设器件等）吗？

15）是否提供了测试点？

16）测试装置（如逻辑探测器的探针）是否易于与印制电路板连接？

17）是否分散开较长的覆铜区以防止起泡？

18）在必要的地方是否有效使用了屏蔽？

19）所刻文字的形式和尺寸是否合适，以便于装配完后容易辨识？

3.11.2　电气规划

1）电路图和布局图是否完全兼容？

2）在印制电路板上，电路是否分成了许多具有一定功能的子单元？

3）是否分析了导线的阻抗、电容量和电感的效应，尤其是重要的电压降和接地问题？

4）是否在连接部分尽可能短的情况下，保证了信号传输平稳？

5）是否采取了最佳的预防措施，如输入和输出线路的最小长度，路线的选取（guidelines），明确的隔离？

6）是否提供了足够的导线间距？

7）地线宽度是否足够？

8）在电源线和地线间是否有强耦合？

9）模拟电路部分和数字电路部分是否有独立的地线？

10）极性的判别是否准确？

3.11.3 机械规划

1）印制电路板的尺寸是否是最佳的？

2）印制电路板的尺寸是否适用于制造过程？

3）不稳定的或较重的部件是否安装合适？

4）安装的电路板是否符合抗震要求？

5）不同孔径的数值是否限制到了最少？

6）终端和控制器的位置是否与整个装配相谐调？

7）是否使用了专业的标准元器件的引脚间距？

8）是否提供了工具定位孔？

3.12 文档资料

文档资料是印制电路板设计和制造过程中很重要的一部分。通常情况下，各个公司已经为此建立了标准、表格、清单和文件档案。然而，一些制图对于参考记录的保持来说也很重要，详述如下。

1. 原理图

原理图是文档资料中最重要的组成部分，它和版面设计一起表示了印制电路板各个元器件之间的相互连接关系。在原理图上必须清晰的标出进行版面设计时需要考虑的一些特殊要求，这些特殊要求包括：

1）热源，如可能产生很大热量的元器件和需要远离热敏感元器件的那些元器件；

2）重要的信号性能，注意导线长度、线宽的选取以及具有防护作用的信号路径周围地线的布设；

3）输入/输出终端或连接器，应当预先确定它们在设备的印制电路板中的位置以及安装顺序。

所有这些要求以及必要的说明必须清楚的标示出来。

2. 部件清单

对于简单的电路来说，电路图中本身通常也会包含一些元器件的规格说明。当然，大多数情况下，进行装配的各部件都会根据要求在部件清单中列出，其中包括以下信息：

1）参考名称（R1、C1、C2 等）；

2）制造商代码的或元器件编号；

3）参数描述；

4）简短的说明；

5）总的数量。

3. 制造用图

制造用图包括电路板的空间结构，孔的尺寸和位置，材料和程序说明。制造用图应显示出印制电路板的非元器件面布局，应包括：

1）印制电路板的形状和厚度；

2）材料（板材、导线和镀层）；

3）孔的位置和尺寸；

4）编号和安装孔的位置、直径；

5）测试、检查和限制要求；

6）改变/修正的控制说明。

4. 装配图

装配图包括印制电路板中需要装配的所有电子元器件和机械部件，它给出了电路板的布局和详细的装配说明。对于雏形面板来说，装配图可能会由一个印制电路板原图的设计图组成，在这上面附加有元器件的外形和代码。

5. 原图

原图展示了印制线路精确的比例结构，用于制作原始图样的照相底片。它显示的仅仅是那些在电路板的制作过程中必须保持为铜板模式的部分，包括所有相关的焊盘和导线的尺寸及间距，以及它们在电路板上的位置。它还要显示出标识符号和所需要的测试模式。

原图比例：在手工版面设计中，版面的规划是非常重要的，因为如果设计出来后又需要修正，那就是件很麻烦的事情了，甚至可能有必要对原图进行全部重新设计。为了规划原图的比例，了解电路设计的要求以及以清单的形式评估同样的系统是非常有用的。清单可以包括：

1）电路板的尺寸，用 mm 为单位（要考虑到其在设备中的最终位置）；

2）电路板的形状（是否由最终产品的形状来决定）；

3）元器件的数量和类型；

4）机械安装顺序；

5）根据电流和电源线类别，对电源线的详细说明；

6）信号线电流；

7）元器件钻孔尺寸。

一些因素会导致原图的不准确性。最明显的因素是人的局限性，如把焊盘位置放置的精确程度、绘制或原图印制的导线间的平行度、所需尺寸的自我粘

合性材料的有效性。因此，按照 1∶1 的比例制作的印制电路板，尤其是那些使用集成电路的镀通孔的印制电路板的尺寸的精确度通常不能满足产品的可靠性要求。所以，大多数原图的制作采用的是 2∶1 的比例，这使原图的面积是实际印制电路板面积的 4 倍。对于高精度细导线的印制电路板来说，要选择 4∶1 的比例，这是实际印制电路板面积的 16 倍。

3.12.1 文档文件

建议一份完整的文档文件应具备以下必要的信息：

1）封面：标题、日期、版本号、客户详细资料、方案特点；

2）原理图：按照 CAD 使用的格式存放在磁盘上；

3）材料单：部件清单；

4）部件注释：部件编号缩写术语表，包括封装尺寸、导线间距、公差注释和最佳型号；

5）制造说明：包括相关的先前产品的运行情况——如所遇到的问题、检测方法等；

6）钻孔图：表示印制电路板上每一个孔的位置和尺寸的图；

7）印制电路板版面布局：按照 CAD 使用的格式存放在磁盘上；

8）实际尺寸印制电路板的涂覆图：表示印制电路板元器件的位置和标识的图。该图印制为允许元器件放置的实际尺寸，以供测试。

3.13 几个常用标准

1）IPC-2220：设计标准系列。包括所有的 IPC-2220 系列的 IPC 通用设计标准。

2）IPC-2226：用于高密度互连（HDI）印制电路板的部件设计标准。为高密度互连印制电路板制定设计要求和注意事项，包括元器件的安装和互连结构。

3）IPC-JPCA-2351：高密度相互连接结构和微孔设计指南。关于 HDI 和微孔设计规则与结构的选择的指南，包括设计范例和步骤、材料的选择、一般的描述和各种微孔技术。

4）IPC-2221A：关于印制电路板设计的一般标准。包括印制电路板的设计以及单面板、双面板或多层面板的元器件安装或互连结构的一般要求。

5）IPC-2222：刚性印制电路板的综合标准。包括刚性印制电路板的设计要求，元器件安装和互连结构。

6）IPC-2224：印制电路插件的电路板设计综合标准。涵盖了印制电路插件

的印制电路板设计要求，其中包括关于弯曲和扭曲约束的要求、散热问题和元器件布局的要求。

7）IPC-2225：用于多芯片模组-基板（MCM-L）和 MCM-L 装配的部件设计标准。包括单芯片模组-基板（SCM-L）、多芯片模组（MCM）或 MCM-L 装配中关于热量、电子、机电和机械的要求和注意事项。

8）IPC-2615：印制电路板的尺寸和公差。包括基本尺寸和公差标准、位置、剖面、定位和形状公差以及详细的几何符号的使用。

9）IPC-D-322：使用标准仪表板尺寸时选择的印制电路板尺寸的指导原则。为使用标准制作的仪表板尺寸时印制电路板的尺寸选择而定义的指导原则。

10）IPC-M-105：刚性印制电路板指南。关于刚性印制电路板的尺寸、公差、资质和性能方面的最新标准。还包括焊接性测试、聚合体厚膜印制电路板、焊盘模式和高速电路设计。

11）IPC-1902：印制电路的 IPC/IEC 网格体系。被 IPCA 采用的国际标准，可以确保印制电路和安装在网格交叉处的元器件兼容。

12）IPC-D-325A：印制电路板的文档要求。为全面描述印制电路板的最终成品而详细说明的一般要求，包括样图的绘制要求、电路板的说明和原图/照片加工的说明。

第4章　特殊电路的设计

4.1　模拟电路设计准则

在当今的世界，尽管有超过60%的电子设备仍然还是模拟的，人们也可以很容易的想象出生活在一个完全数字化的世界里是什么样子。关于模拟电路的印制电路板设计准则，需要从以下三个主要方面考虑：

1）元器件布局；

2）信号线；

3）电源线和地线。

4.1.1　元器件布局

特别是在模拟电路印制电路板设计中，元件的布局是一个至关紧要的环节，应当遵循以下重要准则：

1）需要通过前面板直接访问的元器件，必须按照设计者的要求准确定位；

2）需要对内部电路进行调整的元器件，如电位器、微调电容器、开关等，应当放置在电路板的边缘并且容易进行操作的位置；

3）带有金属壳的元器件不要与电位器、微调电容器、开关等离的太近，否则，用螺钉旋具调整组件时，容易造成组件与设备底盘之间短路；

4）产生热量的元器件与热敏元器件的放置必须格外小心，产生热量的元器件应当远离热敏元器件；

5）产生热量的元器件应当尽可能均匀地散布在整个电路板上，以避免电路板局部过热；

6）容易吸热的元器件必须通过隔热装置将其从电路板中隔开，并且应当在电路板上留出放置隔热装置的空间；

7）当需要安装螺钉时，必须留出安装螺母和垫片的空间，并且注意下面不要和电路连通。

4.1.2　信号线

在模拟电路印制电路板中，信号线能完成各种功能，如信号输入、反馈、输出以及提供基准信号等。因此，对于不同的应用，信号线都必须以各种方式进行优化。但是，有一个公认的准则就是在所有模拟电路印制电路板中，信号

线应尽可能的短，这是因为信号线越长，电路中的感应和电容耦合就越多，这是不希望看到的。现实情况是，不可能将所有的信号线都做成最短，因而，布线时首先要考虑的就是最容易产生干扰的信号线。

特别是在下列电路中，信号线的布线需格外引起注意：

1）高频放大器/振荡器；

2）多级放大器，特别是输出功率较高的放大器；

3）高增益直流放大器；

4）小信号放大器；

5）差动放大器。

1. 高增益直流放大器

高增益直流放大器通常用于小信号放大。当晶体管或直流放大器等器件被焊接在印制电路板上时，就会在铜箔和器件引脚的连接处形成热电偶，从而产生不同的交变电压，对放大器形成一个干扰信号。为了使直流放大器输入级周围的温度变化率达到最小，并且保持恒定，建议将输入级用一个隔离装置包围起来，以避免其周围空气流动所造成的影响。

2. 差动放大器

差动放大器只对两个信号的差值进行放大，而对其公共的电压信号将不予放大。如果差动放大器和印制电路板设计不合理，当信号电平较低时，公共电压就会产生一个小的差动干扰信号。差动放大器的输入阻抗高，输入端任何参数的不平衡都会给电路造成很大的干扰。所以，在印制电路板设计时必须确保放大器在物理结构上完全对称。

在差动放大器的输入端存在一个确定的漏电阻，它可以造成不平衡的电压偏移。这个问题可以通过在输入电路增加防护装置加以解决，如图 4-1 所示。防护装置将信号线包围，如果它能和两个输入信号线的低电平端保持相同的电压，

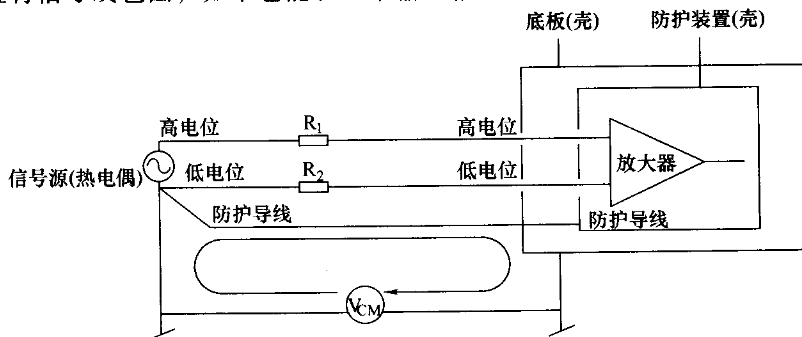


图 4-1　差动放大器的防护装置

注：信号源端的防护线连接在低电压端

就会引起有效电阻的增加。这种装置能够确保信号源终端和防护体与信号源的低电平端电平相同。图 4-2 为如何在印制电路板上安装信号线防护装置。防护线要形成一个圈，将信号线从输入端到放大器的输入连接点都包围起来，并且和设备的防护装置相连，这对于处理低电平差动信号是一种行之有效的方法。另外，小信号差动放大器的印制电路板基材更适合使用环氧玻璃材料，这有助于减小漏电流。

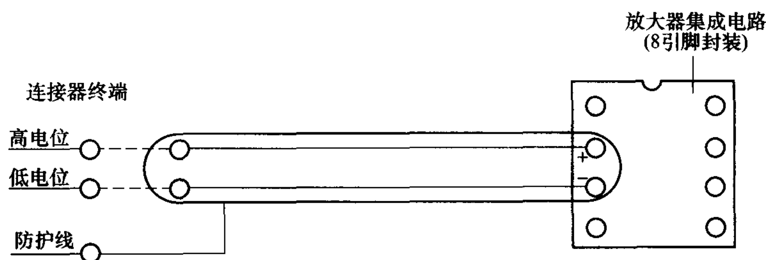


图 4-2 印制电路板上信号线的防护措施
（经 Bosshart 同意绘制，1983）

3. 微小信号放大器

该信号放大器处理的是微小信号，包括以下两种类型。

（1）高阻抗（低电流）放大器

这种放大器中，两个相邻的信号线间存在电容耦合，这会严重影响电路的性能，甚至导致低电平信号被覆盖。

高阻抗电路中，两导线间的电容耦合如图 4-3 所示。为了减小耦合，建议在高阻抗的信号线之间，以及其他干扰信号之间保持足够的距离。一般情况下，该距离至少为信号线宽度的 40 倍。

无论如何，低电平信号线的对地电容应该很高，以便减小耦合电压。这就是说，低电平信号导线应当靠近地线。如果不能保证低电平信号线之间有足够的宽度，可在它们之间布一条地线，以降低耦合，如图 4-4 所示。

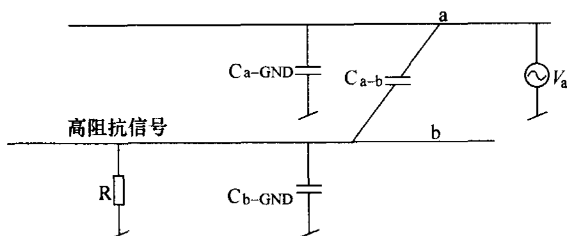


图 4-3 高阻抗电路中两条导线之间的电容耦合
（经 Bosshart 同意绘制，1983）

当放大器使用光电池或化学电池作为电源时，电源阻抗可达到数百万甚至是数亿欧姆。如果蚀刻后印制电路板没有进行充分地清理，残留在电路板表面的电解液就会在邻近的导线间

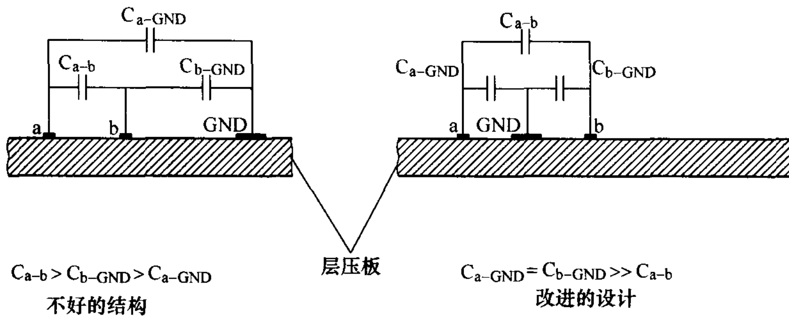


图 4-4 在平行的信号线之间布一条地线以减小串扰
（经 Bosshart 同意绘制，1983）

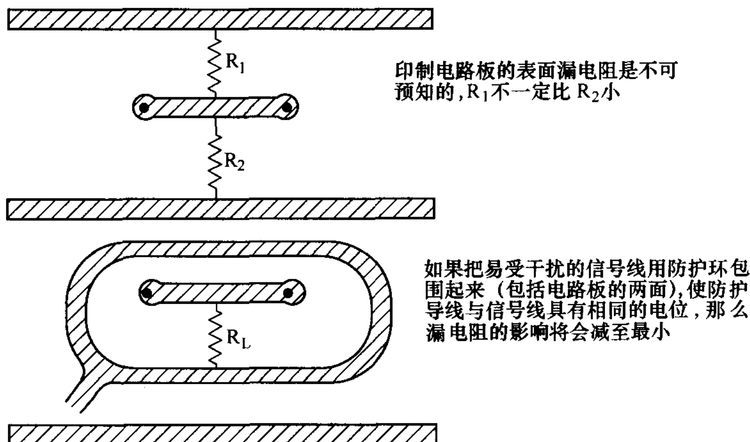


图 4-5 使用防护装置后印制电路板上的漏电阻示意图

产生较大的电阻，甚至即使电路板完全清理干净了，仍有不大于 $10^{12}\Omega$ 的漏电阻存在。而且，这些电阻不可能是等方性分布的，以致于两条邻近导线间的电阻可能比距离较远的两条导线间的电阻更高。因此，低电平 I/V（电流/电压）转换器的输入应当在印制电路板两面都用防护环路保护起来（见图 4-5），防护环路应连接到与总的连接点等电位的点上。如果做到这些，漏电阻的精确值就不那么重要了，因为加在它上面的差值电压已很小了。

高阻抗放大器印制电路板不能使用镀通孔。印制电路板材料的体积电阻率比表面电阻率更低，在基板上很难安装防护环。最好的方法就是把高阻抗放大器的终端连接到聚四氟乙烯绝缘体上，而不是印制电路板导线上，如图 4-6 所示。

（2）低阻抗（低电压）放大器

在低阻抗电路中，有可能产生感应电压，这是因为电路中有感应耦合或磁场存在。这种干扰可通过以下方法减小到一定程度：

1）将高电平交流信号线与低电平信号线保持足够的距离；

2）在信号线附近布设地线；

3）避免形成接地环路，以防外部磁场干扰低电平信号。

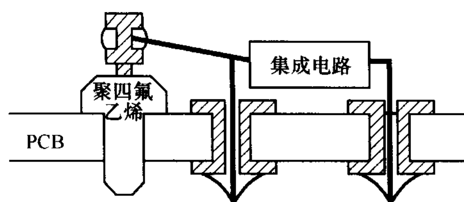


图 4-6　聚四氟乙烯隔离绝缘体的应用
（它比印制电路板线路具有更低的漏电阻）

4. 高频放大器/振荡器

如果高频放大器印制电路板布线不合理，就会导致放大器带宽的降低，如图 4-7 所示。这是因为两条靠近的地线和信号线之间会形成一个大电容，这个电容与输出电阻一起构成一个低通滤波器。

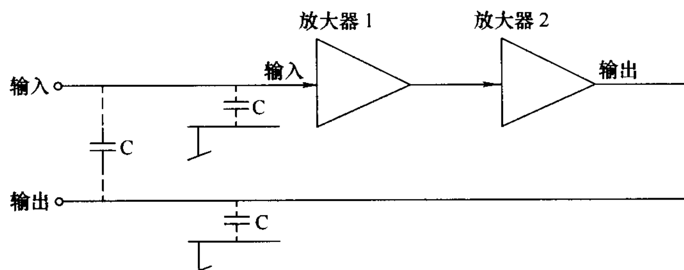


图 4-7　高频放大器结构

这个低通滤波器使放大器带宽降低。同时，如果输入信号线和输出信号线彼此接近，反馈信号就会引起振荡。为了避免这些问题的产生，上述导线之间应该留有足够的空间间隔（Lindsey，1985）。

电子电路的设计者通常都有这样一个共同的经历，那就是如果设计一个高频放大器，实际上它却会产生振荡。在振荡器的布局中也会遇到类似的问题，它不按照所设计的频率振荡。这种问题的产生是由于信号线之间存在电容耦合，因此，在印制电路板布局时很重要的一点就是减小信号线之间的耦合电容。

5. 具有高功率输出的多级放大器

如果电源线和地线太长，多级放大器很容易产生低频振荡。由于导线自身具有电阻率，由高功率输出引起的大电流将会流过这些导线。在电源和地之间加一个足够大的电容，形成电源去耦电路，就可以解决这个问题（见图 4-8）。或者，对于不同的放大级分别提供独立的电源和地线，这样就不会有公共的电源和地线通路了。

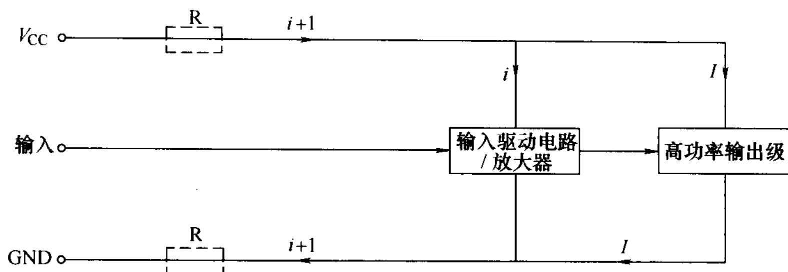


图 4-8　具有高功率输出的多级放大器

注：提供独立的电源和地线，避免公共电源和地线通路

4.1.3　电源线和地线

电源线应该足够宽，以保证低电阻和小电感，但是，电容耦合将随着宽度的增加而增加。

在同一块印制电路板上，模拟电路和数字电路的地线网络应该严格分开。同样的，参考电压通常对于地电平的波动很敏感，应该从电源线中分离出来，直接接到印制电路板的输入端，并且它的地线应该独立地连接到设备中一个稳定的参考地端。具体连接如图 4-9 所示。

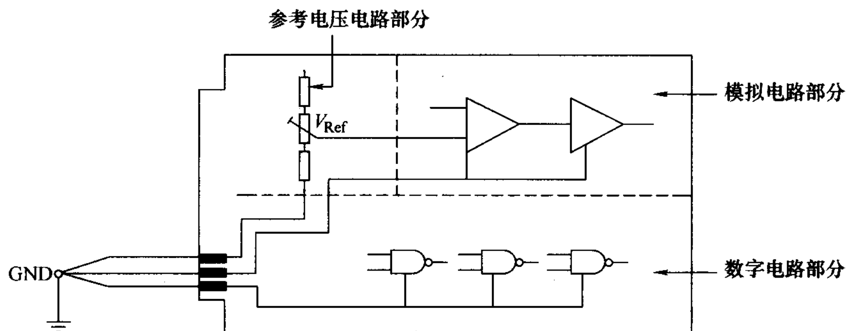


图 4-9　模拟电路和数字电路部分的参考地线分开连接

实际生活中，地线既有电阻又有电感，还有未知的电流流过，并且当电流流过电阻时会产生电压降。印制电路板 CAD 程序在地线设计方面有很大的不足，因为它们将所有导线设计得尽可能细，以便保存铜箔的面积，这样就会有很高的地电阻。有一种显而易见的方法可取代细的地线——将印制电路板覆铜面的所有地线连接在一起，形成一个连续的“接地面”。由于 0.001in （0.025mm）铜的电阻大约是 0.67mΩ/in²，通常情况下，这样就足够了，但也不都如此。

4.1.4 模拟电路印制电路板的通用设计准则

模拟电路印制电路板的一些通用设计准则是：

1）信号线尽可能短，这样通过导线引起的电压降就会减小，由控制环路产生的电磁干扰也会减小。

2）提供独立的模拟地和数字地，两个地只有一个连接点。

3）系统地和实际地之间只有一个连接点。

4）电容屏蔽罩只连接一次，为噪声源提供返回路径。

5）电磁屏蔽罩必须由具有高穿透性的材料制成，以便有较好的屏蔽效果。

6）金属应当没有残余电流。

7）保持系统平衡，以防共模信号变成串模信号。

8）系统带宽的限定要满足信号带宽的要求。

9）环路区域要小，应着重考虑电流流过的环路。

10）在两个印制电路板间使用双绞线连接，提高系统的噪声抗干扰能力。

关于软封装在高速模拟印制电路板设计中的使用，特别是包含通孔和 SMT 组件、屏蔽以及信号频率达到 2GHz 时的使用说明参见 Meyer 等人所述（1991）。

4.2 数字电路设计准则

到目前为止，印制电路板要完成的惟一任务就是提供足够的区域放置各种必需的组件和导线，并将其进行电气连接同时保证散热良好。导线的布设应防止电压下降。现在，数字集成电路的广泛应用使得器件具有极高的开关速度和很短的上升时间，电磁波的传播性能变得越来越重要，需要认真考虑。基于这些情况，如果驱动元器件的上升时间和下降时间比传播延迟时间的两倍还要小时，印制电路板就可以作为传输线使用了。

需要明确的是，电路上升/下降时间比工作频率更为重要。无论如何，频率依赖于上升/下降时间，上升/下降时间越短，器件的工作频率就越快。因此，传输线是可用的，对于那些可用做传输线的导线，很有必要了解其相关的电气性能。另外，性能阻抗必须和接收设备相匹配，以防反射。

4.2.1 传输线

在一根长电线或导线附近放置一根返回的电线或导线，以此为例来说明传输线的概念。电线的整个长度上都有电感分布，并且在电线与它的返回线之间也有耦合电容存在。由于电容和电感为集总元件，所以如图 4-10 所示的导线对通常称为集总模式图。事实上，电感和电容连续分布在整个导线上。理论上，

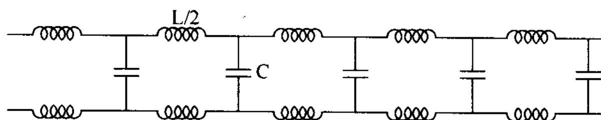


图 4-10 传输线：由电感和电容组成的无限长网络

导线可以是无限长的，而图示中只是其中的一小部分。

很明显，如果电线无限长，则在遥远的终端就不会有丝毫的反射。如果电线整个长度内绝对一致，也不会产生反射。所以，避免反射的一个方法就是使用无限长且绝对一致的电线对或导线对。这样的电线对或导线对就被称做传输线（Brooks，2002）。

从电线对的前端向里看，有一个输入阻抗，这个阻抗值可以通过计算得到。它被称做导线的内部阻抗或性能阻抗，由符号 Z_0 表示。如果将集中参数电感值（L）和电容值（C）也计算在内，阻抗可以表示为

$$Z_0 = \sqrt{L/C}$$

如图 4-11 所示，将一根无限长的传输线截为两部分，可以看到第二部分看起来仍是一根无限长的传输线，输出阻抗同样为 Z_0。这就表明，一根有限长度的传输线，其终端阻抗看起来与无限长度的传输线是一样的，均为 Z_0。所以，即使是有限长度的传输线，它的能量也会沿着传输线完全被吸收或耗散掉，没有丝毫剩余能量反射回来，因此完全没有必要担心反射的存在。

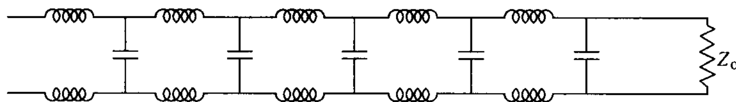


图 4-11 无限长度传输线终端的性能阻抗

这项技术被准确应用于印制电路板的反射控制中，要求导线按照传输线制作，并具有一定的终端阻抗 Z_0。一些类型的传输线已被广泛应用，用做电视电缆的同轴电缆是 70Ω 的传输线，用做网络 10 base 2 同轴电缆的是 50Ω 的传输线。

很明显，印制电路板线路具有传输线的性能。传输线的临界长度通常指“信号在导线中传输时，其两路延时大于脉冲的上升时间”时的长度。例如，在 FR-4 中信号的上升时间为 1ns，则导线的临界长度大约为 3in。

传输线的性能阻抗是一个几何函数。在印制电路板应用中，它是几个变量的函数，其中两个是线路板上的线宽和线高。如果信号线的长度比临界长度大得多，如果导线没有参考标准，则很可能无法控制 Z_0，无法控制导线的长度，也就无法控制反射。这种情况下很可能存在反射，产生噪声电压，错误的信号

将会导致电路出错。

4.2.2 数字电路印制电路板设计中的几个问题

数字电路印制电路板的高频性能已变得越来越重要，所以很有必要了解电路板中作为传输线导线的有关知识（Jeffery，1997）。关于数字电路板的正确设计，主要存在以下问题：

1）反射（引起信号延迟和双列脉冲发射，例如，一个脉冲转化为两个或多个脉冲）；

2）语音串扰（相邻的信号线间产生的干扰信号）；

3）地线和电源线噪声；

4）来自脉冲型电磁场的电磁干扰。

4.2.2.1 反射

数字电路的性能在于快速上升和快速下降时间。因此，印制电路板上的导线不能认为是短路线，但可认为是传输线。这些传输线通常不注意和电源阻抗及负载阻抗相匹配，导致多重反射。这些反射会使电路性能变差，引起信号延迟，甚至引发双脉冲等。所以，数字电路印制电路板设计的关键问题就是使信号导线有合适的波阻抗 Z_0，以使反射降到最小。

如同信号线和地线之间保持适当的距离一样，信号线的线宽也应选取合适，以使波阻抗达到理想值。设计 TTL 和 CMOS 逻辑电路时，信号线要细一些，以便获得相对高的波阻抗值。相反，在 ECL 电路中，信号线则要宽一些。即使数字电路的工作频率较低，保持小的反射也很重要，因为这可以避免双脉冲发射。

1. TTL 集成电路

基本的数字电路是由一个信号线将两个逻辑门连接而成的，具有一个波阻抗 Z，如图 4-12 所示。典型波阻抗值的划分参见图 4-13。

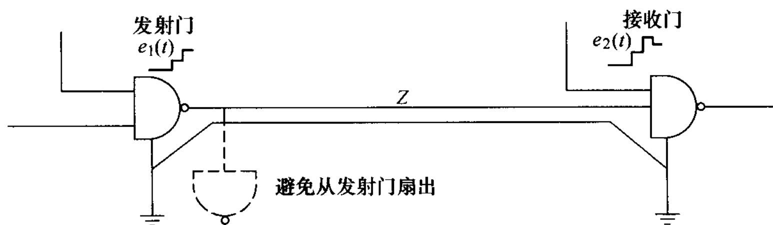


图 4-12 TTL 电路中发射门通过传输线驱动接收门

TTL 集成电路中，导线波阻抗的理想值设定为 100～150Ω，获得该值要求的线宽为 0.5～1.0mm。TTL 电路中，如果选取较宽的信号线，将会使波阻抗达到 50Ω 或者更小，这会使集成电路由于大的反向尖峰电压而损坏。

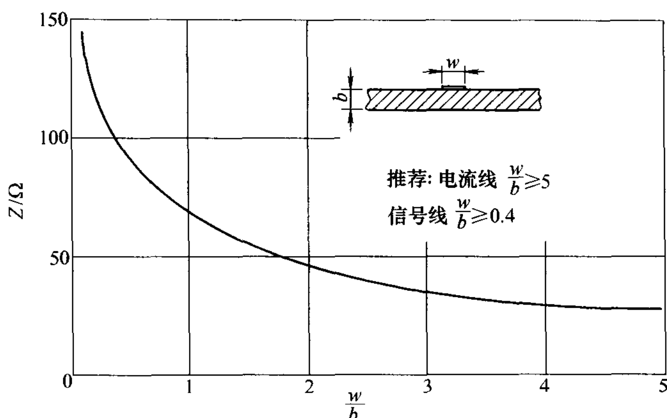


图 4-13　印制电路板导线的波阻抗 Z

同样，高的波阻抗导线（≥200Ω）也应该避免，因为这能造成过载损坏并引发双脉冲发射。虽然非常高的波阻抗在印制电路板布线中不常有，但在松散的终端开路的电线中却常常出现，所以，应当避免使用松散电线，印制电路板信号线的连接点也应设在地线附近，最好和地线拧在一起。

2. CMOS 集成电路

CMOS 集成电路中，导线的波阻抗要求为 150 ~ 300Ω。信号线的线宽选取越小就会获得越高的波阻抗。通常，信号线的线宽≤0.5mm 时波阻抗的范围为 150 ~ 300Ω。所以，CMOS 电路中应当避免选取宽的印制电路板导线。在 CMOS 电路中，对串扰信号以及地线和电源线的噪声信号没有严格的要求，所以不要求宽的电源线和地线。PCB 之间的连接导线应当避免选取 50Ω 的电缆，同时，为了获得较高的波阻抗，地线与信号线也不能离得太近。

3. ECL 集成电路

ECL 集成电路中，信号线的波阻抗要求为 50 ~ 100Ω。与 TTL 和 CMOS 集成电路相比，ECL 的波阻抗要求更小。这个小的波阻抗值可由选取的宽导线处获得。ECL 集成电路中，导线的宽度要求为 1 ~ 3mm。

即使达到这样的波阻抗，反射仍有可能发生，这会影响电路的性能，特别是造成上升边缘的附加延迟，对于 ECL 电路而言，这通常是不能接受的。因此，ECL 系统中，外部电路组件的形式为线驱动/线接收集成电路，这至少可以提供部分阻抗的匹配。

4.2.2.2　串扰信号

串扰信号是指两相邻信号间产生的干扰信号。如果两条彼此平行的导线长度超过 10cm（对于 ECL 电路）、20cm（对于 TTL 电路）、50cm（对于 CMOS 电路），就会在其相邻的导线中产生一个小的尖峰电压，甚至是一些脉冲干扰。由

于 CMOS 系列电路的抗干扰能力较强，串扰对它的危害也就较小。但是，ECL 电路的抗干扰性能较差，它对于串扰比 TTL 电路更敏感。

图 4-14 分析了串扰的基本原理。假设 A-B 线上有一个从 A 到 B 的脉冲信号，此时传输到点 X，那么在与其相邻的导线 C-D 的对应点上就会产生一个耦合信号。它很可能是一些很小的电容耦合，由于平行导线类似于传输线，它也有可能是电感耦合。在大多数印制电路板中，导线间是很好的绝缘材料，所以导线间没有很强的耦合。因为电容和电感效应会随着距离的增加而减弱，任何耦合都会随着导线距离的增加而减小，所以，减小串扰的一个很好的方法就是增大导线的距离（Scaminaci Jr.，1994）。

导线 A-B 和 C-D 之间的耦合只在传输交流信号时才会产生，对于稳定的直流信号则不会产生。对于高频信号或者信号的谐波频率部分，耦合较大。因此，为了减小串扰，应尽量降低频率谐波，增大上升时间。耦合效应概述如下（Brooks1997a）：

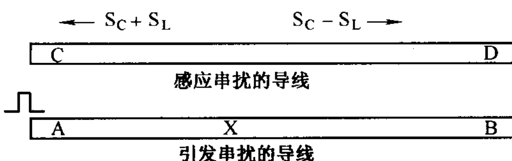


图 4-14　串扰的基本原理

1）互电容耦合——在两导线之间由于电容耦合产生信号 S_C，信号在耦合的导线中向前或向后以相同的极性传播。

2）互感耦合——在两导线之间由于电感耦合产生信号 S_L，信号在耦合的导线中向前或向后以相反的极性传播。

3）方向性——串扰信号可以向前或向后传播。互电容耦合和互感耦合的串扰信号向前传播时大小相等、极性相反，因而可以相互抵消。当它们向后传播时大小相等、极性相同，因而信号是加强的。

4）强度——向前传播的串扰信号看起来像驱动信号，（至少在理论上）随着耦合线 A-B（C-D）长度的增加，信号强度会逐渐增大。向后传播的串扰信号相位差为 90°时（响应阶梯函数）达到最大值，无论耦合线长度如何增加，信号的强度都不会再增加。

5）环境——如果两条导线布设于均匀的材料中，互感耦合和互电容耦合串扰信号中向前传播的部分几乎是完全相等的，可以相互抵消，所以，通常不必担心向前传播的串扰信号。如果周围的材料不均匀，互感耦合信号就比互电容耦合信号要大。所以，要想减小串扰信号，易产生耦合的导线应该被置于带状线中（导线布设于均匀的材料中）。

为了保持较小的串扰信号，信号线和地线之间的波阻抗应该很小。很明显，靠近地的金属板会极大地削弱串扰。在抗干扰性更小的 TTL 和 ECL 电路中，可以在两条信号线间布设一条地线并设置合适的波阻抗，以解决串扰问题。

在高速电路中，平行线间的串扰问题变得更为严重。如图 4-15 所示，串扰信号与 $H^2/(H^2+D^2)$ 成正比，此处 H 为导线与金属板之间的距离，D 为两条导线之间的距离。可以看出，当两条导线之间的距离增加时，串扰信号减小。但是，若其他条件不变，当导线与金属板之间的距离减小时，串扰信号也将减小。因此，金属板在减小和控制串扰信号时是很有用的（Brooks，1997b）。

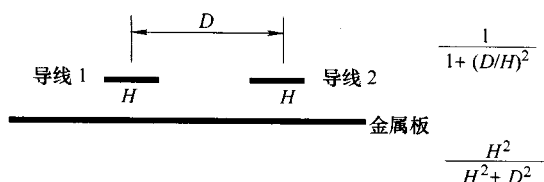


图 4-15　典型的串扰结构

如果两条平行导线与金属板之间的距离不同，则 H^2 就变成两个距离的乘积，串扰信号的表达式变为 $1/1+(D^2/H_1 \times H_2)$，如图 4-16 所示。

对串扰信号进行估值时常是很困难的，通过几个简单的假设可以得到，但是结果只能是近似，而并不精确。有一种方法可以对这些数据进行校准，那就是将这些数据在旧电路板上进行测试，以此了解这些数据对电路性能的影响。这些数据可为以后电路板性能的改进提供参考。

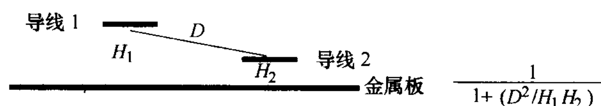


图 4-16　具有不同导线高度的典型串扰结构

4.2.2.3　地线和电源线噪声

电源和地信号的主要影响来自于地线上的电流尖峰脉冲，当数字集成电路进行开关转换时，这些电流尖峰脉冲会引起传输问题。内部和外部的电流尖峰脉冲叠加在一起，作用于相同的电源（V_{CC}）和地线上。如果许多相似的门和触发器都连接到同一个点上，电流尖峰脉冲就会变得更大，情况将会更糟。

对于 TTL 电路、简化的 ECL 电路以及高度简化的 CMOS 电路，地线和电源线噪声是一个很严重的问题。在设计印制电路板的地线和电源线时，设计者应当遵循以下设计规则：

1）电源线和地线之间的波阻抗应该较小，其值为 20Ω 或者更小，这样会稳定 V_{CC} 和地之间的电压差。解决的方法是将电源线和地线分别布设于双面印制电路板的两面，并使之垂直交叉。电源线和地线的理想线宽是 5～10mm。

2）用大面积的覆铜面做地线可使其具有高电磁稳定性。实际上，在多层电路板中，可以把其中一层完全做为地线层，或者将印制电路板中所有不用的部分覆铜保留，并将其与地线相连，例如角落等。大面积的覆铜面使得在地线上很难产生尖峰电压，对于数字电路，采用地线栅格也可以达到理想的效果。

3）数字电路和模拟电路应避免使用相同的地线。因为模拟电路易受干扰，而数字地线总会存在地噪声，该噪声可达到毫伏数量级。

4）在功率电源线中使用去耦电容：每 2～3 个 TTL 集成电路，通常使用 10nF 的去耦电容；对于 CMOS 和 ECL 电路，通常使用 5nF 的电容。去耦电容通常采用陶瓷电容，而不采用电解电容。

在设计 TTL 印制电路板时，必须严格遵守以上规则，因为数字电路中很容易产生尖峰电流，大面积布设地线对此也是绝对有效的。而在 CMOS 电路中，布设较窄的地线则更为合适。

4.2.2.4　来自脉冲噪声的电磁干扰

电磁辐射会降低电路性能，一般称为电磁干扰（EMI）。通常，数字电路要进行很好的电磁屏蔽，以避免电磁干扰。屏蔽盒使用导体材料制成，通过反射和/或吸收电磁波降低电磁干扰。屏蔽盒可以安放在电路的任何地方，可以是整个设备或单独的电路板、元器件等。即使如此，由于这样或那样的原因，一些干扰仍然能够进入到数字系统中。最常见的是由继电器、转接器、电动机等引起的高频脉冲噪声，它会串入到电源以及电源电缆中。在电源板面加一个电磁干扰滤波器即可解决这个问题。罗宾逊（1990 年）阐明了保护电子设备免受电磁和射频干扰的屏蔽形式。

电磁兼容在印制电路板中的自主应用是十分迫切的需求，Saltzberg et al. 于 1996 年论述了经济型高分子厚膜电磁兼容防护设施在此领域的应用。Markstein（1995 年）阐述了对器件、印制电路板和电子系统进行电磁干扰防护的屏蔽原理以及市场上使用的相关屏蔽产品。

对于 TTL 以及其他任何高速逻辑电路，想要通过屏蔽和电源滤波器对全部电感进行屏蔽时常是很困难的。如果在电磁干扰噪声高的环境中使用 TTL 电路，应注意使逻辑信号线和地线之间保持较小的距离。也就是说，印制电路板上信号线和地线要彼此靠近，印制电路板之间相互连接时也应如此。

相对于 TTL 电路而言，CMOS 电路对干扰却不是很敏感。所以，地线与信号线通常不要求靠得很近。但是，CMOS 集成电路很容易受到过压损坏，特别是对于静电电压，要求有专门的保护和测量电路。

4.3　高频电路设计准则

如果信号的频率超过了 300MHz（在数字电路中）和 100MHz（在模拟电路中），就被认为是高频信号。在此频率工作时，印制电路板上很短的导线也被看作是传输线。

导线或印制电路板达到以下长度“l”（以米为单位）时，则被看作是传输线

$$l > \frac{3\text{MHz}}{f_{\text{upper}}}$$

式中，f_{upper}为信号的最高频率（MHz）。

这样的传输线具有一定的阻抗，叫做“波阻抗”。宽导线比窄导线的波阻抗要小，同样，离地较近的导线比离地较远的导线波阻抗小。如果传输线的波阻抗与电源和/或负载的波阻抗不匹配，就会产生反射。反射会引起带宽的减小和脉冲上升时间、下降时间的增加。所以，对于高频脉冲信号电路，一定要准确设计印制电路板，以消除这两种不匹配。

传输线的延迟时间约为 5～10ns/m，如果线路不匹配，上升时间就会增加到传输线延迟时间的若干倍。粗略地估算，可能为 10～100ns/m 或 0.1～1.0ns/cm。

如果 R_S，$R_L \ll Z_0$，导线呈现电感性；如果 R_S，$R_L \gg Z_0$，导线呈现电容性。

式中，R_S 为电源阻抗；R_L 为负载阻抗；Z_0 为传输线的波阻抗。

所以，导线阻抗必须和电源阻抗以及负载阻抗相匹配。如果阻抗匹配，在有用的频率范围内，导线几乎不会造成任何明显的振幅衰减。然而，对于较短的导线，阻抗匹配时常很困难，导线或是呈现电容性，或是呈现电感性。此时，印制电路板设计者必须根据电容性或电感性哪个更好而进行选择。

地线和电源线在高频应用中也扮演着重要的角色。这是因为在高频元器件中，从电源线流出的电流会反馈到地，例如尖峰电流。直流电源的电压不能保持连续，这对电路性能会造成极大的影响。所以，作为一个基本规则，电源线必须尽可能的短。

以下是高频电路印制电路板设计时非常有用的准则：

1）使用一片地或是很大的接地表面作为地线；

2）使用宽电源线；

3）地线和电源线彼此应当很近，且平行；

4）在地与电源之间放置一个去耦电容；

5）在高速脉冲系统中，由于趋肤效应和电介质损耗会随着导线长度增加而按比例增加，所以导线应当尽可能短；

6）对于大尺寸的印制电路板，介电质损耗格外重要。因此，使用印制电路板时要注意是否有合适的高频范围；

7）判定哪一种寄生元件（电容和电感）危害性更大，并以此为依据进行布线；

8）保持所有不匹配的线尽可能短，否则上升时间会增加到 1ns/cm；

9）当寄生电容可能使电路性能变差时，可为其提供一个地线连接（直接接地或通过一个电容接地）。

4.4 快速脉冲电路设计准则

当印制电路板上的导线长度 l（单位为 m）满足下式条件时，就可被看作是传输线：

$$l > \frac{t_r}{100\text{ns}}$$

式中，t_r 为脉冲的上升时间（ns）。

当快速脉冲在导线上传输时，会发生以下情况：

1）如果传输线或连接线与信号源及负载都匹配，并且传输线不是很长，就会有大约 5ns/m 的短暂延迟。

2）如果传输线只与信号源或负载中的一端匹配，就可能会在信号源端或负载端产生反射。

3）如果传输线与信号源及负载都不匹配，就会产生很多反射，造成干扰及脉冲上升时间和下降时间的严重减慢。所以，对于快速脉冲，必须避免与信号源及负载任何一端的不匹配。

如果不匹配程度达到 ±20%，就会造成脉冲的严重失真，陡峭的边缘会变成弧形。

当两个印制电路板之间的连接线超过 10～20cm 时，必须使用同轴电缆或双绞线（信号线与地线紧紧地扭曲在一起），否则就会产生多种复杂的反射，对电路造成无法估测的影响。常用同轴电缆的波阻抗为 50Ω 或 75Ω，双绞线的波阻抗为 100Ω 或 150Ω。

在快速脉冲电路中，各种类型的损耗、特别的趋肤效应以及电介质损耗都会使上升时间随着导线长度的增加而增加。所以在高频和脉冲电路中，最重要的准则就是保证导线尽可能短。以下就是减小这类损耗的有效方法：

1）趋肤效应损耗：增加印制电路板的厚度，保证导线尽可能短。

2）射频损耗：在印制电路板的一面使用接地导板，减少印制电路板的厚度并避免不连续，使信号线尽量靠近地平面。

3）电介质损耗：使用高频性能好的印制电路板电介质材料。

为减少这些损耗，应遵循的准则是：对于非常快速的脉冲（t_r < 1ns），即使是匹配的导线也要保持很短。对于这些损耗，匹配导线的上升时间增量为 1～10ps/cm 或 100～1000ps/m。

在高频和脉冲电路中，在以下领域还具有极大的挑战性：

1）系统时间：在设计高频印制电路板时，系统时间是一个很重要的参数。系统时间是指检测数据是否已经可靠地传输。为了达到系统时间的要求，从一

个元器件到另一个元器件的导线要尽可能短。例如，很长的高频信号线可能会导致错误的逻辑，将数据 1 读为数据 0。

2）波形完整性：波形完整性是指信号应当满足电性能要求，即得到仿真的电信号。通过设置合适的信号线波阻抗，可以达到信号的完整性。信号线的波阻抗与线宽有关。

3）串扰：与反射一样，串扰也是由传输线引起的。如果传输线靠近地线或地平面，则串扰会很小。通过设置合适的信号线波阻抗也可以防止串扰的发生。信号线的波阻抗与线宽有关，通常信号线的波阻抗与线宽成反比。

4.4.1 受控阻抗

前面已经阐述，当今转换速度之快以及脉冲速率之高，使得印制电路板导线可以看作是传输线时，其电性能由印制电路板设计者控制。很明显，关键的参数是印制电路板导线的性能阻抗。实际上，当数字信号边缘速度超过 1ns 或模拟信号频率超过 300MHz 时，导线的阻抗是可控的。通常，信号线的电子时延超过其上升时间的 30% 时，就必须考虑受控阻抗（Polar Instruments，2001）。

印制电路板上的器件都有其固有的性能阻抗，印制电路板互连导线的阻抗必须与所用的逻辑器件的性能阻抗相匹配。如图 4-17 所示，为了将信号从信号源（器件 A）最大量传输到负载（器件 B），导线阻抗必须和发送器件（器件 A）的输出阻抗及接收器件的输入阻抗（器件 B）相匹配。对于 CMOS 和 TTL 电路而言，导线的阻抗范围为 80 ~ 110Ω。在高速数字系统中，如果连接两个器件的 PCB 导线阻抗与器件的性能阻抗不匹配，就会在导线中产生很多反射，造成转换时间的增大和随机误差的增加。

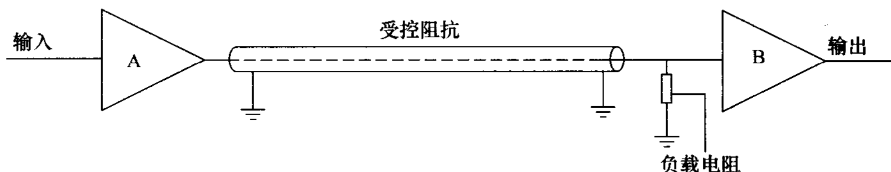


图 4-17　单端印制电路板导线

图 4-17 中单端传输线是连接两个器件最常见的方法。只有一条导线将信号源与负载相连，信号的返回路径由参考地（平面）提供。这是一个不平衡电路，信号线与返回线在几何上不同——信号线与返回的地平面具有不同的横截面。

在单端输入（不平衡输入）或差动输入（平衡输入）结构电路中，可控阻抗印制电路板通常使用微型条纹或条纹传输线（Polar Instruments，2003C）。差动结构的连接方式如图 4-18 所示，该结构一般用于抗干扰能力及转换时间要求

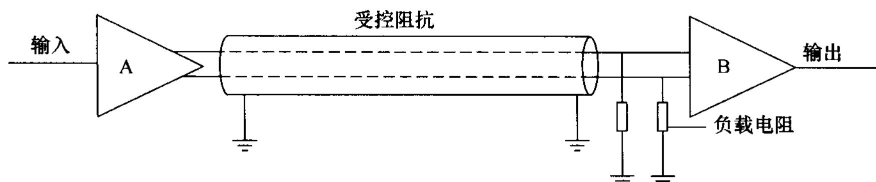


图 4-18　差动印制电路板导线

比较高的电路。这种结构具有平衡的导线——信号线与返回线的几何结构相似。导线上传输的信号成对出现，一条导线与另一条导线中的信号波形极性相反。两条导线中的磁场彼此抵消。因此，这种电路中的电磁干扰和射频干扰比不平衡结构电路要低，外部噪声也随之减小。

印制电路板导线的阻抗可通过以下几何参数的设置精确控制，如图 4-19 所示：

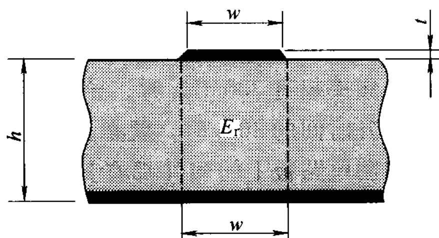


图 4-19　表面微带导线结构

1）信号线的宽度（w）和厚度（t）；

2）导线每个面的芯体或半固化片材料高度（h）；

3）芯体或半固化片材料的介电常数（D_k/E_r）[㊀]；

4）导线和板的结构；

导线的性能阻抗和这些物理参数的关系如下：

1）与导线宽度成反比（$Z\propto 1/w$）；

2）与导线厚度成反比（$Z\propto 1/t$）；

3）与碾压高度成正比（$Z\propto h$）；

4）与碾压 E_r 的平方根成反比（$Z\propto 1/\sqrt{E_r}$）

印制电路板导线的阻抗是由它的感抗、容抗、电阻及电导决定的，其典型范围为 25～120Ω。实际上，印制电路板的设计者将会详细说明电路板导线的阻抗值及其允许误差，并要求印制电路板制造商遵守该规范。

阻抗的计算很复杂，它所依据的参数也很难控制（UltraCAD Design，2000）。实际应用中大多数情况下要求导线的阻抗恒定，但并不一定知道其准确的数值，除非电路底板与其他电路板接口需要。当把受控阻抗的导线从电路板的一层移至另一层时，除非这两层电源参考平面立即转换极性，否则就会引起

㊀ 介电常数为 D_k 或 ε_r。——译者注

重大的难以预料的问题。除此之外，旋转和通孔一般都不会造成阻抗大的变化。

大多数印制电路板的可控阻抗都要经过 100% 的测试。阻抗测量通常采用时域反射测量法，时域反射测量法就是将阶跃电压通过一个可控阻抗的电缆和一个探针加在取样导线上，在脉冲波形中产生的任何反射都可通过时域反射测量法测试出来，并指示出阻抗的变化量，这就是所谓的不连续（Polar Instruments, 2003）。时域反射测量法能够指示出不连续点的位置和不连续程度。通过时域反射测量法对取样长度的导线进行测试，使用合适的软件，就可绘制出阻抗的曲线图。借助于导线性能阻抗的图形表示法，可在生产环境中预先进行复杂的测量。

4.5 微波电路印制电路板的设计准则

4.5.1 基本定义

前面已经讲过，在高频电路中，印制电路板导线可以看作是传输线。除了传输线以外，还应理解一些其他有用的术语，如下所示。

1. 反射系数

当连接到传输线的信号源没有完全被性能阻抗所消耗，能量就会从终端反射回来，反射波通常为入射波的一部分

$$\rho = \text{反射系数} = \frac{\text{反射波振幅}}{\text{入射波振幅}}$$

2. 电压驻波比

当传输线上传输的为正弦电压时，则传输线上任何一点的电压值均为入射电压与反射电压之和。因此，当传输线长度超过输入信号波长的一半时，传输线上就会有电压的最大值和最小值出现。由图 4-20 可以看出，电压驻波比（VSWR）为

$$\text{VSWR} = \frac{\text{传输线电压的最大值}}{\text{传输线电压的最小值}}$$

VSWR 与 ρ 有关

$$\text{VSWR} = (1+\rho)/(1-\rho)$$

3. 传播方式

当信号源与传输线相连时，就会沿传输线传播。传播的方向、电磁波的振幅和时间参数共同决定了信号波的性能。

最常见的传播方式是横向电磁波（TEM），TEM 的电场和磁场方向与信号的传播方向垂直。

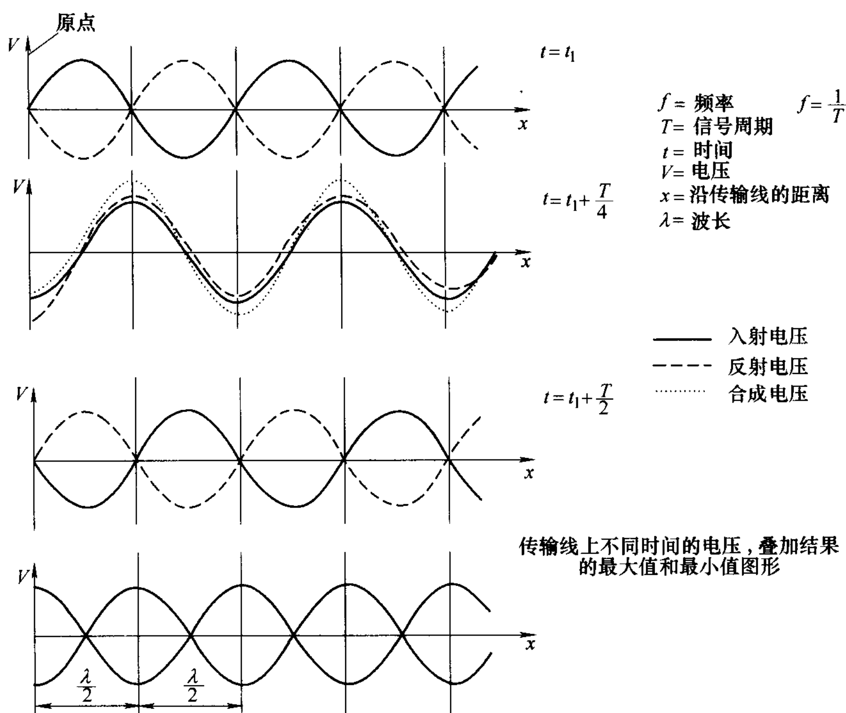


图 4-20 传输线中电压的最大值和最小值

（经 Bosshart 同意重绘，1983）

4.5.2 带状传输线和微带传输线

目前，高性能印制电路板导线被人为地看作是传输线。理论上，有几种类型的平面传输线，其中，带状传输线和微带传输线是最通用的类型，详述如下。

4.5.2.1 带状传输线

带状传输线主要是由两块印制电路板构成的三明治形状：其中，一个是双面印制电路板，传输线在一面，地线在另一面；另一个是单面印制电路板，整个区域都为接地面，如图 4-21 所示，这种传播方式就是 TEM。在这种传播方式中，电场和磁场的方向与信号的传播方向垂直。

印制电路板带状传输线有两种典型的结构：

1）中心或对称带状传输线：该传输线结构如图 4-22 所示，为三明治状结构，其中心位于两个参考平面之间。这是很难做到的，因为导线上面或下面的碾压层必须是 C 类或 B 类（磁芯或半固化片）材料。

2）偏移或非对称带状传输线：该传输线结构如图 4-23 所示，为三明治状结构，其中心位于两个参考平面之间，但是距离一个平面比另一个平面更近一些。

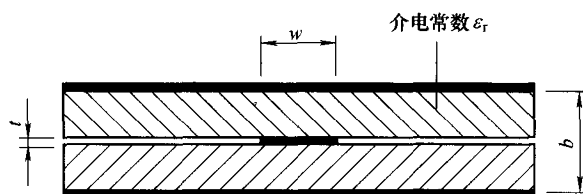


图 4-21　带状传输线

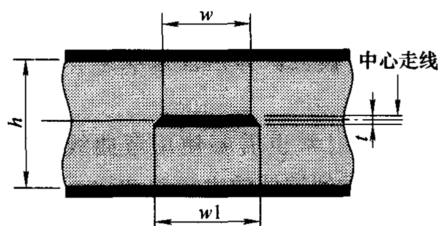


图 4-22　对称带状传输线结构

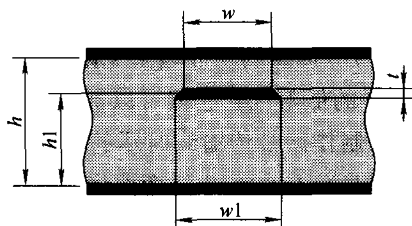


图 4-23　非对称带状传输线结构

3）双带状传输线：该传输线结构如图 4-24 所示，在与顶部的接地面距离为 $h1$ 的位置上有一条镜像导线，这两条信号线以邻近的两个层面为参考平面为三明治状结构。这两个信号层的导线垂直放置，以使内部串扰达到最小。也就是说，信号层互相垂直，使得交叉区域达到最小。这种结构可以看成是两个独立的非对称带状传输线。(Polar Instruments，2003)

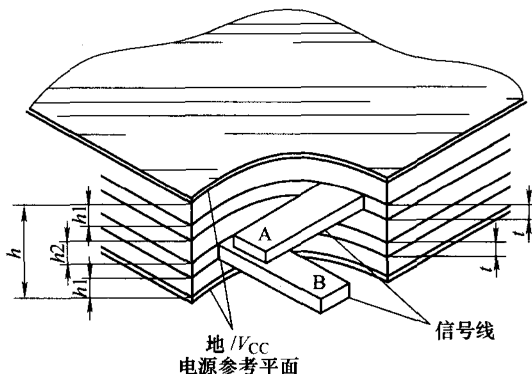


图 4-24　双带状传输线结构

带状传输线的阻抗是由其物理结构和电介质材料的电性能决定的。这些因素是指信号线的宽度和厚度，导线两面的磁芯或半固化片材料的介电常数和高度，以及导线和板面的结构。

4.5.2.2　微带传输线

微带传输线就是导线在一面，而地线在另一面的双面印制电路板，如图 4-25 所示。换句话说，微带传输线是由低损耗电介质上的可控宽度的导线构成的，

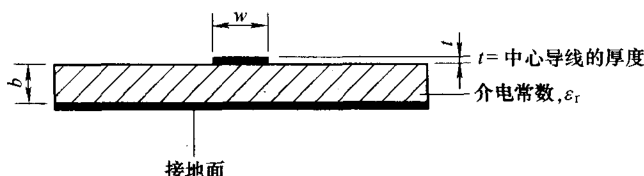


图 4-25　微带传输线结构

该电介质放置在一个导电的接地面上。电介质通常是由环氧强化玻璃制成，例如 G10 或 FR-4，或高频电路中使用的 PTFE（聚四氟乙烯）。

微带传输线中波的传播方式不是严格的横向电磁波，而是类似于横向电磁波，这是因为电介质不均匀以及传输线没有对称的接地面导致的。

微带传输线重要的尺寸是 w（上部的线宽）、h（碾压厚度）和 g（接地面的广度）。理想的 g 应当是无限的，实际上，$10w$ 就被认为是理想状态。对于小于 30Ω 的低阻抗，它就可以被减小至 $5w$。

在制作微带传输线时尽管直线是最好的，但时常也需要使用弯曲线。当频率达到几 GHz 时，如果弯曲度刚好为 45°，就会达到较低的电压驻波比，如图 4-26 所示。同轴连接器最好是通过电路板的接地面插入，而不是连接到电路板的边缘，如图 4-27 所示。

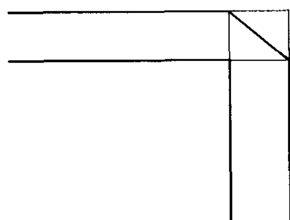


图 4-26　为了得到好的电压驻波比，传输线应成 45°弯曲

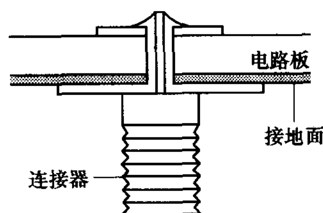


图 4-27　插入到印制电路板接地面的同轴连接器的使用方法

下面介绍几种印制电路板微带传输线的结构（Polar Instruments，2003b）：

1）表面微带传输线：如图 4-28 所示，这是最简单的微带传输线结构。它只有一条信号线，顶部及侧面都暴露在外，附着在介电常数为 Er 的电路板表面，以电源或接地面为参考。表面微波传输线可以通过在双面印制电路板的一个表面蚀刻而成。

2）嵌入式微带传输线：也叫掩埋式微带传输线，其结构同表面微波传输线类似，只是信号线嵌入在电介质中（见图 4-29），与参考平面的距离为 $h1$。

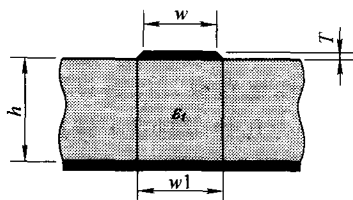


图 4-28　表面微带传输线

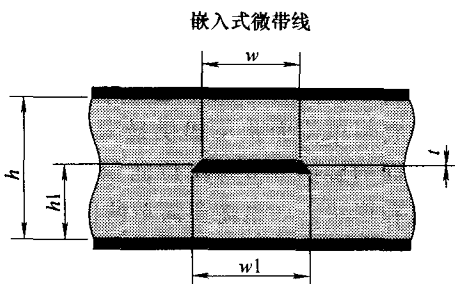


图 4-29　嵌入式微带传输线

3）涂敷式微带传输线：如图 4-30 所示，其结构类似于表面微波传输线，只是表面由一层焊锡膜覆盖。焊锡膜可以降低阻抗。根据焊锡膜的类型和厚度不同，其阻值可达几欧姆。

4）微带传输线的性能阻抗计算需要复杂的数学公式，通常使用包括边界元素分析的场解决方法。

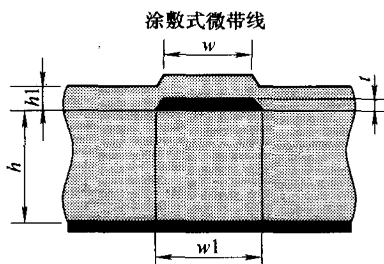


图 4-30　涂敷式微带传输线

4.5.3　传输线与无源元件的等效

许多电子电路，如调谐放大器、滤波器等，都工作在微波频率，使用电感、电容等无源元件。然而，电感线圈和平板电容器的值太小，用普通的方法很难制作。不仅仅是物理尺寸小，而且寄生效应也可能会干扰电路性能。因此，惟一的方法就是使用长度合适且与终端相匹配的传输线，充当电感和电容。图 4-31 给出了连接电源和负载的传输线的典型结构。

通过选择长度合适的传输线，可以获得适合任何频率的理想电感或电容值。大家都知道，对于长度一定的传输线，其电感和电容值是频率的函数。所以，只要具备与终端匹配的长度合适的传输线，就可以制作微波电路印制电路板。随着印制电路板制作工艺及微波电介质材料的发展，现在可以在单一层面上制作传输线，通过线宽控制传输线的性能，以满足所有的实际需求。

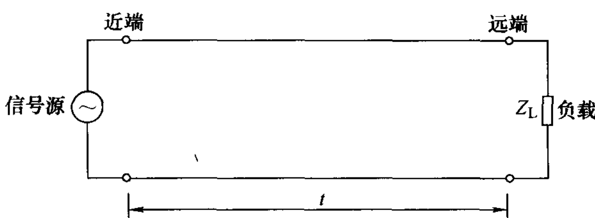


图 4-31　连接电源和负载的传输线

前面已阐述过，传输线可用作无源元件。如果传输线很短，则可与传输信号的波长相比拟，可近似看作无源元件，比如电感或独立的电容。薄传输线可用作电感，厚传输线可用作电容。基于几何学原理，扁平螺旋形是最通用的类型，因为它每单位面积可提供最大的电感量。对于双面电路板，可通过放置在电路板两面的旋钮调节每单位面积的电感量。图 4-32 为几种印制扁平螺旋电感的电感值和形状。如果需要简单的低品质因数（Q）的电感，则可采用如图 4-33 所示形式的电感。对于给定区域，其电感值近似于螺旋电感的 1/10。

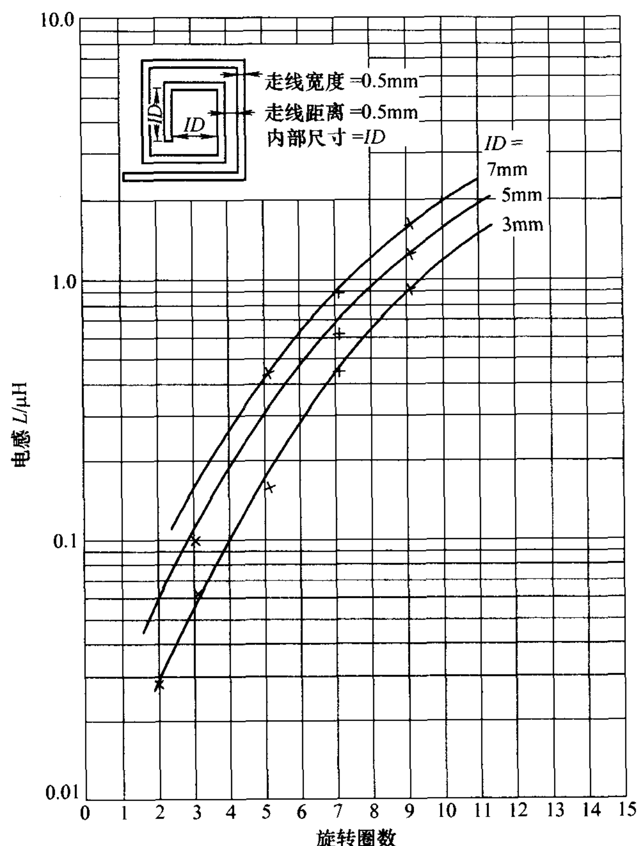


图 4-32 连接信号源和负载的印制扁平螺旋型电感传输线的电感值和形状（经 Haskard 同意重绘，1998）

这些等效元件可用作滤波器、阻抗变压器、匹配器件等。例如，图 4-34 就是一个低通滤波器，它将传输线分段用作电感和电容，该低通滤波器的截止频率为几 MHz。



图 4-33 印制电路弯曲型电感

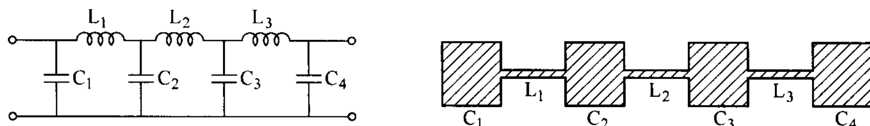


图 4-34　低通滤波电路及其实用的微带形式

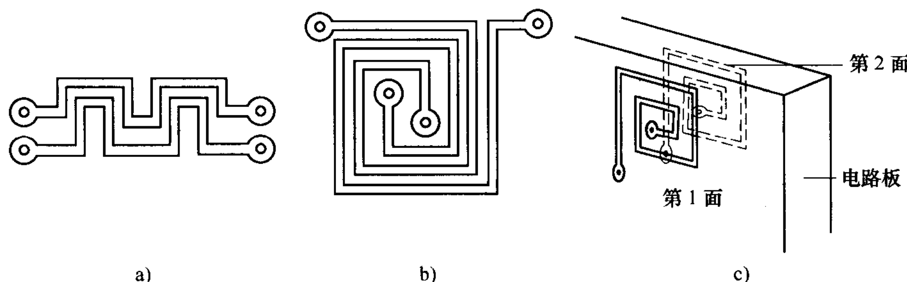


图 4-35　印制电路变压器实例（经 Haskard 同意重绘，1998）

a）弯曲变压器　b）在电路板一面制作的螺旋变压器　c）在电路板两面制作的螺旋变压器

变压器也可制成印制电路形式，图 4-35 为变压器的几种结构。弯曲变压器的耦合很小，只有 10%，而螺旋变压器可达 90%。

4.5.4　微波电路的通用设计

微波电路中，对于线宽的精度要求非常高，否则就会产生严重的 VSWR 电压驻波比。例如，将 75Ω 的信号源连接到 75Ω 的负载上，就要使用性能阻抗精确值为 75Ω 的传输线。这样，不会产生反射，VSWR 严格为 1。

如果由于线宽减小，导致传输线的性能阻抗为 80Ω，同样使用该线将 75Ω 的信号源连接到 75Ω 的负载上，则反射系数 $\rho = (80-75)/(80+75) = 0.032$，$VSWR = (1+\rho)/(1-\rho) = 1.032/0.968 = 1.066$。由此可见，如果线宽不够精确，电压驻波比就会变得很差。

为了获得高精度的线宽，在设计微波印制电路板时，应该将实际尺寸放大 4 ~16 倍进行处理。

沿带状线和微带线传播的波会削弱的原因在于：介电损失；导线损失；辐射损失（主要是在微带线中）。所以在制作微波印制电路板时要选取合适的材料，以使损失降到最小。选取高介电常数的材料能够降低辐射、减小介电损失、缩小微波印制电路板的体积，这样可扩展微波印制电路板在较高频率电路中的使用。用于高频电路（包括微波电路）的介电材料有 Rexolite 1422 聚苯乙烯、用陶瓷粉末填充的硅酯和聚四氟乙烯纤维玻璃。

4.6 功率电路设计准则

如果电路为低功率、小的信号上升时间和大的信号电平，则对功率分配系统的要求就不是很严格了。但是，如果这些因素发生了改变，功率的需求就会增加，这就需要进行周密的设计，以找到有效的方法解决印制电路板功率分配和元件大量散热的问题。

功率电路比普通电路的设计要求更严格。如果电路板设计不当，当印制电路板上传输很大的功率时，容易引发事故，造成极为严重的后果，甚至可能伤及人员。在设计功率电路印制电路板时需要注意以下几个方面的问题。

4.6.1 高功率电路与低功率电路的分离

如果电路中的电流小于3A，则属于低功率电路，如果电路中的电流为3A以上，则属于高功率电路。通常，使用可行的低功率电平控制电路来控制有源高功率电子元件，例如，当TTL电路在5V电压工作时，如果拉电流小于1A，就可以控制晶闸管的导通，产生高达50A的电流。通常，可以将功率调节电路以及它所控制的电路设计在同一块印制电路板上。图4-36为一个简单的晶闸管整流器控制电路。可以看出，具有绝缘作用的脉冲变压器被安装在印制电路板的高功率电路而不是控制电路中，这是因为它的次级线圈用于驱动高功率晶闸管整流器控制电路。如果将低功率电路和高功率电路设计在同一块印制电路板上，就会在功率电路和控制电路之间产生电容和电感耦合，致使设备出现故障。所以，低功率电路与高功率电路应当设计在不同的印制电路板上。

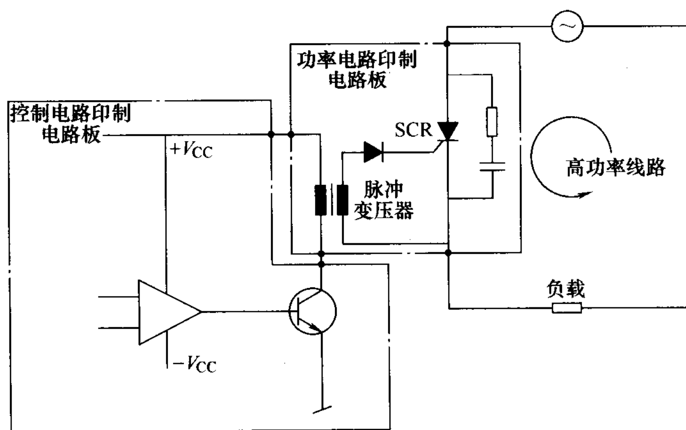


图4-36 高功率电路与低功率电路的分离设计（经Bosshart同意重绘，1983）

4.6.2　基板材料厚度

功率电路器件通常需要有一个合适的散热器，以散发一定的热量。如果散热器直接安装在印制电路板上，则整个电路板会上升到同样的温度。所以，基材的选取必须能够承受器件的连续工作，通常选用环氧玻璃层压板。最常用的压板厚度为1.6mm，在需要安装较重的器件时，如脉冲变压器、散热器、扼流圈等，则选取压板厚度为2.4mm或3.2mm。现在，散热器以粘贴的形式应用以便印制。

4.6.3　铜箔厚度

低功率电路最好选用铜箔厚度为35μm的覆铜层压板，而高功率电路通常选用铜箔厚度为70μm的覆铜层压板。对于一些特殊的电路，还可选择铜箔厚度为105μm的覆铜层压板。

4.6.4　导线宽度

设计功率电路印制电路板时，电路板表面可用的铜箔应充分用作大电流的导线。其制作方法，首先是确定导线间的距离，然后将剩余的铜箔分配用作导线。传输大电流的导线应当选取较大的线宽，因此，很有必要分析电路中的电流，以确定印制电路板中最可能出现电流故障以及导线最容易出问题的地方，并确定导线能够承受的极限电流。如果不这样做，就要尽可能增加导线的宽度。

4.6.5　大电流导致的电压降

在功率电路中，印制电路板导线中的大电流会造成可观的电压降，因而，应当尽可能地避免这些大的负载电压降。如果这些负载电流必须通过印制电路板，而不能被旁路掉，则在设计导线时就应当确保这些大的电压降不会影响电路的正常功能。

4.6.6　散热问题

印制电路板上热量的产生主要有两个来源：电路板本身和安装在它上面的组件。每个系统（和组件）都有一个最大的工作温度，因而必须确保温度不能越界。散热器的使用、强制排风冷却、组件的布局以及电路板的水平或垂直安装都会影响电路板及其组件的温度。

根据由铜线引起的最高允许温度，表4-1列出了允许的最小线宽，其目的是确保在不同的直流电流下，温度上升不会超过10℃、20℃和40℃。应当记住的

是1mm的线宽可以通过2A多点的安全电流，这不会造成超过导线额定的电压降。

表4-1　不同直流电流下，温度不超过10℃、20℃和40℃时的最小铜线线宽

上升温度（35μm铜箔） 最小铜线线宽/mm 直流电流/A	10℃	20℃	40℃
0.5	0.15	0.10	0.06
1.0	0.40	0.25	0.15
2.0	0.80	0.50	0.30
5.0	3.25	1.75	1.00
10.0	8.00	4.70	3.00

以上数值只是确定在静态电流时电路板上升的温度，此外，还必须加上由任何大的直流电流、交互电流或开关电流所引起的重要组件产生的热量。幸运的是，现在的EDA工具可以根据电流和产生热量的关系快速准确地进行热量分析。任何相应的电路仿真程序（例如SPICE）都应该能够对静态和动态的热量生成进行仿真。

4.7　高密度互连结构

细密球栅阵列、芯片级封装以及其他先进技术已越来越多，这就意味着印制电路板必须采用新的设计和制作技术使组件更加细密和小巧，高速的时钟和大的信号带宽也要求电路板的结构设计必须竭力克服由于射频和电磁干扰对电路板性能造成的不良影响。另外，有限的成本限制了传统方法在制作密度高、体积小、重量轻、速度快的互连系统方面的使用。印制电路板微通孔互连技术的使用为这些问题提供了一个行之有效的处理方案。(Brist et al，1997)

微通孔是指直径小于或等于6mils（150μm）的孔。目前最典型的应用是盲导孔和埋导孔，在同一块印制电路板内穿过绝缘层进行互连。当多层印制电路板的最外层与相邻的信号层互连时，通常采用盲导孔结构。盲导孔和埋导孔可用于各种形式的电子产品，以最低的成本有效地进行高密度组装。信息处理中心（IPC）已经将高密度互连结构（HDIS）定为了一个术语，泛指各种形式的微通孔技术。(Holden，2003a)

使用微通孔可以使组件布局彼此更加靠近，这样就可以在更大的区域内布设走线。微通孔可直接设置成焊盘形式，这样就省去了从焊盘连接到孔的短导线。增大电路板组件的密度有时可以将所有的组件都放置在电路板的一面，这样可以节约制作双面板的高昂费用。图4-37说明了用传统方法和微通孔方法制

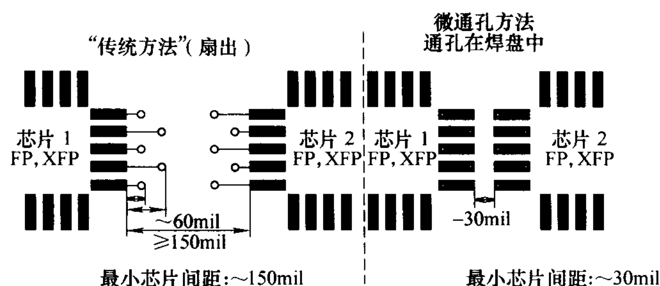


图 4-37　使用微通孔，组件可以彼此放置得更近，具有更大的走线布设区域（经 Merix Corporation 同意绘制）

作的印制电路板在尺寸上的差别。

印制电路板的密度可由其导线容量来衡量，导线容量是指每平方英寸基板上导线的英寸数值。电路板总的导线容量是由路径的宽度以及每个路径上走线的数量决定的，路径的宽度是指相邻的孔或组件的焊盘间距。当然，每条路径上走线的数量都是由走线的线宽、间距以及焊盘的大小决定的。微通孔设计使得孔的焊盘尺寸减小，从而达到很高的布线密度。

盲导孔和埋导孔（见图 4-38）还有助于减小电路板的尺寸和层的数量，它们只连接那些需要连接的层。像普通孔一样，盲导孔也是镀铜孔，只是将印制电路板的一个外层与一个或更多的内层相连，但是它不贯穿电路板所有的层。埋导孔也是镀铜孔，它连接一个或更多个内层，但是不连接外层，因而埋导孔是一个完全内部的孔或是埋在印制电路板里面的孔。现在半导体封装需要更多的内部连接，盲导孔和埋导孔的使用为这些连接提供了更好的方法，占用的空间也更少。

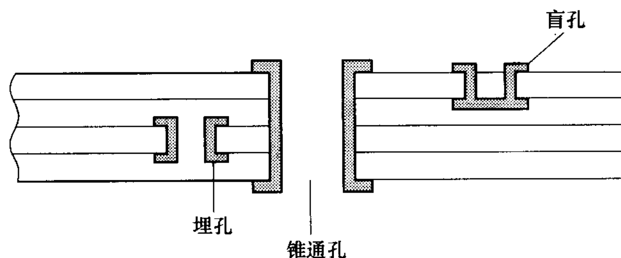


图 4-38　盲导孔和埋导孔占用较少的空间实现更多的连接

4.7.1　高密度互连结构的驱动

4.7.1.1　密度

半导体的复杂性和电路总门数的增加要求集成电路必须有更多的引脚以及更小的引脚间距。在1.0mm引脚间距的球栅阵列集成电路中，一般不超过2000个引脚，在0.65mm引脚间距的电路中，一般也不超过296个引脚。随着离散元器件变得越来越小，集成电路的封装趋于球栅阵列形式，电路板上的接点数量也在不断增加。当每平方英寸的平均接点超过100个脚（接点）时，连接这些元器件的导线空间就会变得更小。若采用SMD，则每平方英寸可布设的通孔和走线会超出人们的能力范围。由于每平方英寸超过大约120个接点，电路板的层数就不得不增加，并且成指数上升趋势，如图4-39所示。

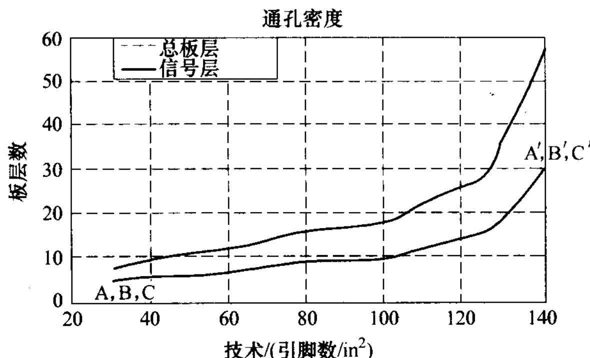


图4-39　引脚数和层数之间的关系

（经Holden同意重绘，2003a）

注：如果每平方英寸的引脚数超过130，板层将成指数增加。

为了保证信号的完整性，并具有更快的上升时间，就需要增加电源线和地线的数量。从而，使得增加多层电路板的层数和使用带有微通孔的高密板成为必须。

4.7.1.2　器件的微小间距

高密度互连结构的出现使得器件的引脚间距缩小到了1.0mm，但是高密度互连结构真正投入使用开始发挥优势时，器件的引脚间距已达到了0.8mm。盲导孔的使用使内嵌孔成为可能，节约了内层空间，同时减小了孔位。典型器件是具有0.65mm引脚间距、240个引脚的数字信号处理器（DSP）。

4.7.1.3　高输入/输出阵列

引脚数大约在600~2500、引脚间距为1.27mm和1.0mm的其他新型组件的应用越来越广泛。其中一些是电信数字开关，大多数是新的现场可编程门阵列（FPGA）。目前产品的封装引脚数为240~1200。

4.7.2　高密度互连结构的优势

微通孔在机械性重复生产中具有以下明显的优势：

1）使用最先进的小型组件可以生产出具有良好电气性能的高密度电路系

统，因而小巧、轻便、而且耐用的产品就问世了。它们可以使走线密度更大，换句话说，可以降低电路板的层数，降低制作成本。

2）由于微通孔的物理结构越来越小、越来越短，所以它的电感和电容就会越来越小，这就使得开关噪声随之减小，走线间的信号反射和串扰也随之减小。

3）由于可布线区域的增加，在元器件周围可以布设更多的接地面，这样地回路的区域就会减少，从而导致了射频和电磁干扰的减少。

4）微通孔使用的材料较少，制作步骤也更简单，从而降低了产品的生产成本。

5）微通孔的制作使用照片反差、激光切除或离子蚀刻技术，重复性机械钻孔更使其具有明显的优势。

4.7.3　高密度互连结构的设计

信息处理中心（IPC）已经制定了相关标准，电路板设计者必须对其通透地理解。其主要内容如下：

1）IPC 高密度互连标准（IPC-2315，IPC-4104，IPC-6016，IPC-9151 [2]）；

2）材料选用（IPC-4104）；

3）堆叠和设计规则（IPC-2315）。

IPC 高密度互连设计标准（IPC-2315）：有助于选择最小的和最简单的设计技术/结构。图 4-40 给出了最常用的微通孔结构（从最简单的 1 型到最复杂的带堆栈的 3 型）。

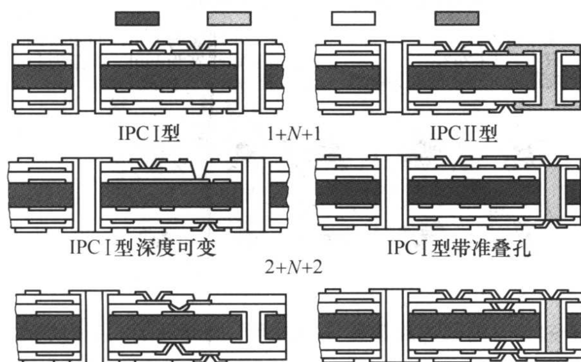


图 4-40　IPC 制定的最常用的高密度互连微通孔结构[㊀]

㊀　原书此图中未标明 3 型。——译者注

材料选用：设计高密度互连电路最重要的步骤是材料的选用，因为这决定了产品的性能及制造工艺。设计高密度互连电路时，可以选用传统多层电路板中不常用的新型材料。强化玻璃钢层压板和树脂涂膜铜是最常用的材料（Holden，1997）。

堆叠和设计规则：设计电路板时，信号层的堆叠和设计规则决定了最大的导线容量（W_c）。根据原理图和全部的元器件以及它们之间的互连，可以估算出整个电路导线的长度，这就是导线需求量（W_d）。实际的导线容量等于最大的导线容量乘以布局效率（LE），所以实际的导线容量总是比导线需求量要大，$W_d \leqslant LE \times W_c$（Holden，2003b）。

布通率是指遵循设计规则实现产品的能力布通率越高，需要的信号层越小或者越少。

Holden（2003b）建议，如果想要设计一个高密度互连结构电路板，首先要安装 CAD 系统，作为最初设计的高密度互连结构电路板的测试工具。这样一个对于密距球栅阵列焊盘图样、焊盘中的孔、在电路装配测试方案、高频测试结构以及菊链可靠性的简单测试工具将有助于解决困扰人们的问题，使人们顺利地设计高密度互连结构新方案。利用 CAD 工具可以定义印制电路板中高密度互连微通孔的结构，可以选用器件的封装，例如可以选用一种 Mentor 图案。

高密度互连设计技术非常有用的一点就是使用盲通孔，这可以拓展内层的路径空间。如图 4-41 所示，由于使用盲通孔，内层的路径空间成倍增加，更多的走线可用于球栅阵列内排引脚的连接。基于这项技术，使用 1/3 ~ 1/2 的信号层即可完成一个复杂的、高输入/输出引脚的球栅阵列连接。

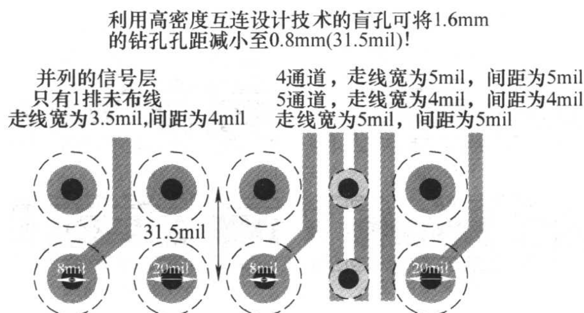


图 4-41　盲通孔为连接器件的内部引脚开通了一个内层通道

类似于传统的印制电路板，许多高密度互连电路板具有可控的阻抗。相对于较快的脉冲边沿速度而言，当走线长度较长时，就要考虑其阻抗要求了。当电路板的设计适用于低电压和高速电路时，噪声容限就会很小，由阻抗引起的反射会更容易发生变化。（Gaudion，2000）

4.8　电磁干扰与电磁兼容（EMI/EMC）

高速数字电路是电磁辐射的主要来源。印制电路板的辐射程度很大程度上受高时钟速率、快的信号上升/下降时间、长的走线以及小的接地栅格的影响。在高频电路中，印制电路板上的走线相当于一个单极天线或环形天线。当走线的长度接近传输信号波长的 1/7 时，必须考虑传输线的影响。如果系统时钟频率是 200MHz，则在 FR-4 中传输信号的波长大约是 0.5m。

Onley（2003）阐述了高速印制电路板设计中的电磁兼容性问题。在数字电路中，脉冲信号“1”或“0”的变换发生在脉冲的前沿。频率和信号上升时间的关系如下

$$T_r = 0.35/\text{频率}$$

式中，T_r 为上升时间（ns）；频率的单位为 GHz。

表 4-2 列出了普通高速集成电路中上升时间和波长之间的关系。

表 4-2　常用数字器件上升时间和波长之间的关系

参数	TTL	肖特基 TTL	ECL	GaAs
输出上升时间/ns	6 ~ 9	2 ~ 3	0.45 ~ 0.75	0.05 ~ 0.20
在空气中的波长/m	6.8	2.5	0.52	0.086
在 FR-4 中的波长/m	3.1	1.2	0.24	0.04

对于 ECL 电路，当传输信号频率达到 0.35/0.45 = 777MHz 时，信号的波长分别大致如下：在空气中为 375mm，在 FR-4 中为 175mm，在陶瓷中为 100mm。所以，在 FR-4 印制电路板中，如果走线长超过 25mm，则应该考虑 ECL 中信号的电磁性能以及传输线的影响。

设计中另一个要考虑的问题是性能阻抗。高速电路中的性能阻抗一般为 50 ~ 80Ω。低阻抗会引起大的 di/dt 串扰，使功耗加倍并造成散热问题。高阻抗不仅会产生大的串扰，而且还会增大电路电磁干扰的灵敏性和电磁辐射。

在印制电路板设计中，回路区域是关于电磁干扰应对的一个重要概念。如图 4-42 所示，一个闭合的电路走线就形成一个回路。这里，干扰全部进入到印制电路板回路内的区域。回路越小，造成的干扰就越小。由于栅格电源的分布，印制电路板电路中可能会包含几个小的回路。最好的分布方法是有一个或两个连续的铜面或铜片。

经常被用作将电路中的电磁干扰辐射和易感性降到最小的四层电路板，其两个中间层分别为电源层和地层，因为这样可以使回路区域非常小。当使用双面板时，没有专门的接地面，就要格外注意回路区域。高频电路，例如晶体，应当全部被地包围。如果有可能应将设备的金属壳接地。

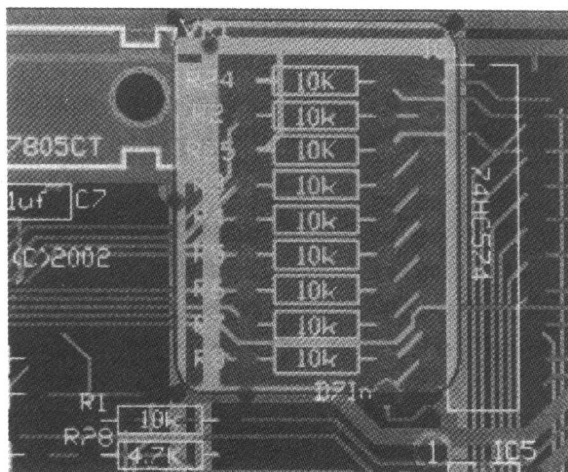


图 4-42 印制电路板设计中，应对电磁干扰的回路区域
（经 M/s AirBorn Electronics 同意）

信号线布设在接地面和电源面之间，具有了一个屏蔽罩，除了为静电敏感设备（SED）提供保护以外，还可以减小辐射（最大可达到 45dB）和易感性。对于那些高速、快速上升时间信号经过的层面而言，这是一个减小辐射的好方法。如果线路之间存在大的电容，则接地面和电源面均可用作参考面。

产生时钟的元件必须放在印制电路板中心附近或是靠近接地底盘处，而不能沿电路板周边放置或靠近输入/输出部分（Montrose，2003）。时钟线应保持很短，线越长，产生射频电流的可能性就越大，可棘手的是产生的射频能量的分布。必须限定时钟走线的长度以提高信号的完整性，防止本可以避免的射频电路的产生。为了使电磁干扰和灵敏性达到最小，检验设计的合理性，可用合适的软件包分析电路板的物理布局、评估信号走线的辐射能量（Lum 和 Waddell，1996）。这类工具很多，有提供传统分析的快速、交互式工具，也有提供详细结构的完整的 3-D 分析工具。

4.9 几个常用标准

1）IPC-SM-782-A：表面贴装设计及焊盘样式——包括修订 1 和修订 2。包括所有类型无源和有源 SMD 的焊盘样式；还包括 EIA/JEDEC 已经注册的组件的波或回流焊接的焊盘样式，尺寸规定及孔的定位准则等。

2）IPC-EM-782：表面贴装设计及焊盘样式的标准数据。包括工业上多数认可的各种焊盘尺寸，为焊盘提供了适当的尺寸、形状及生产误差。

3）IPC-HDI-1：高密度互连微通孔技术纲要。包括生产高密度互连微通孔电路板的标准、规范以及指导方针，还包括多个进行个别说明的其他文档。

4）IPC-6016：高密度互连层或电路板条件及性能说明。包括设计使用微通孔技术的高密度互连层所需的特殊电气、机械和环境需求。

5）IPC-2141：可控阻抗电路板和高速逻辑电路设计。为印制电路板的设计者、封装工程师、制造者以及供应商提供了设计方针。

6）IPC-2252：射频/微波电路板设计指南。包括设计具有实用功能、低成本、频率范围为 100MHz～30GHz 的微波电路板的要求。

第5章　布线图的生成

5.1　什么是布线图

布线图是制作印制电路的基本工具，因为只有它能确定电路板上的板面图形。布线图只显示那些在制作电路板时生成的铜制图形，因此，布线图需要有焊垫、连接盘和导线，根据它们的实际尺寸调节大小，并按比例画在布线图上。此外，布线图还将显示电路板的边线。

布线图是制作印制电路板的第一步，它对最终的成品会产生巨大的影响。显然，成品只能按照布线图的质量和精度完成。布线图生成的必要精准度取决于线路板的尺寸和精度，因此，生成一个精确的布线图的重要性不可低估。印制电路板上出现的问题，比如不精确的对准度、破裂的孔环或者过于苛刻的间距等经常是由于劣质的布线图产生的。清晰精确的布线图需要制作者的技术和耐心。

5.2　手工布线的基本方法

单面板布线图的生成制作简单，而双面板的布线图在制作时，要涉及到两个面之间精确对位的问题。

正确并且精确对位在多基板的制作中也很重要。当电路板成层后为镀通孔钻孔时，由于布线不恰当，各层之间可能会出现短路。

下面介绍准备布线的各种方法。

5.2.1　白纸板绘图

这是电路板布线设计最早最简单的方法。所需的原料有白纸板、优质的黑墨汁和水笔。带蓝线方格的纸一般是最好的，因为这些线在底片生产的感光成像过程中不能复制。适当的聚酯基板在尺寸上比纸板更稳定，也可被用来绘制布线图。而且基板的一面应该粗糙不平，这样墨水就很容易地粘在上面。

在这种技术中，焊盘和中间孔的周线被圆规勾画出来，之间的空隙也涂满了墨水。导线直接以设定的宽度或用双线画出，然后用墨水涂满。

模板可按 1:1，2:1 和 4:1 的比例制作，这对正确绘制焊盘非常有用。这完全是一种手工方法，所以在绘制时很难做到精确。例如，导线的宽度可能至少有 0.1 ~ 0.2mm 的差异，焊盘的位置和导线很可能有 0.3 ~ 0.5mm 的误差。而且

纸板的尺寸不稳定，对于高度精确的电路板来说也是错误的根源，因为温度有 0.01% 的变化、相对湿度有 0.005% RH 的改变，纸板的尺寸就会发生变化。由于这种方法的稳定性和精确度很差，已经很少再用了。

5.2.2　粘在透明基箔上的黑色胶带

从自粘型或者转接型焊垫和精密的胶带问世以来人工布线图的生成已经变得非常简便，并且不再特别依赖于有着高绘画技能和有耐心的绘图员了。

1. 自粘胶带

他们有很广泛的宽度范围，具有 0.5mm、1mm、2mm、4mm 和 8mm 等标准宽度的卷（见图 5-1），并且根据胶带和制造商的不同允许有 0.05 ~ 0.1mm 的宽度误差，可以根据应用需要进行选择。

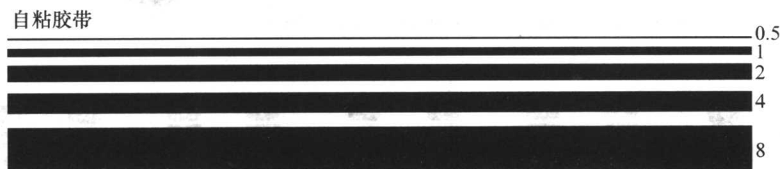


图 5-1　自粘胶带的尺寸

2. 自粘焊垫

自粘焊垫包括环形、正方形、六边形、椭圆形、水滴形和三角形等标准形状。如图 5-2 所示。常用的两种焊垫类型是：自粘型和转接型。

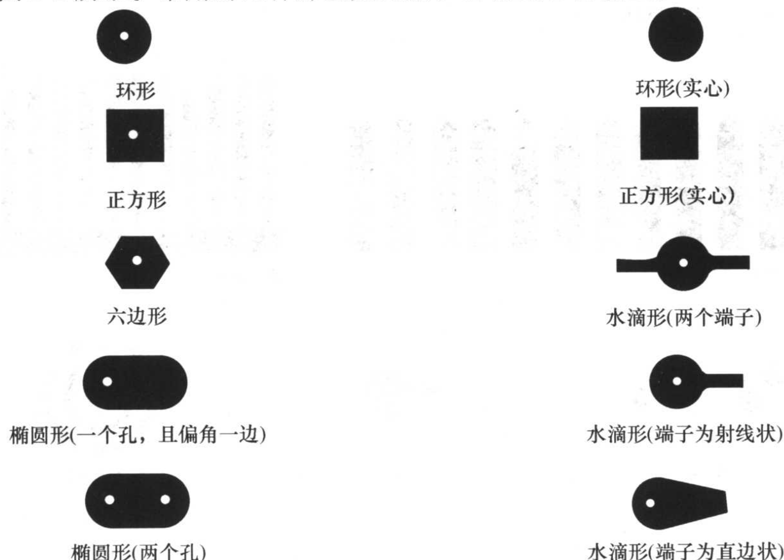


图 5-2　标准的焊垫形状

注：所有焊垫均为 1.27mm

3. 转接焊垫

转接焊垫被印制在典型的 10μm 厚的胶膜上，并放置于透明转接窄带的顶部。通过用木棒或铅笔按压，这个焊垫可以从转接窄带转移到布线图基板（聚酯基板）上。然后，可以从布线图基底将转接窄带掀起，而把焊垫留在上面。

为了使布线图的准备时间减少到最小并实现精确对准，可以使用焊接焊盘形式的焊垫预先排列好图案，如集成电路引脚的图案、邻近连接器的图案和 TO 元件的特殊图案。这些预先排列好的图案通常是用于那些多引脚元件和一般指定引脚图案的元件。例如，16 引脚的集成电路图案被称为 DIP 16 引脚等。一些典型的引脚图案如图 5-3 所示。

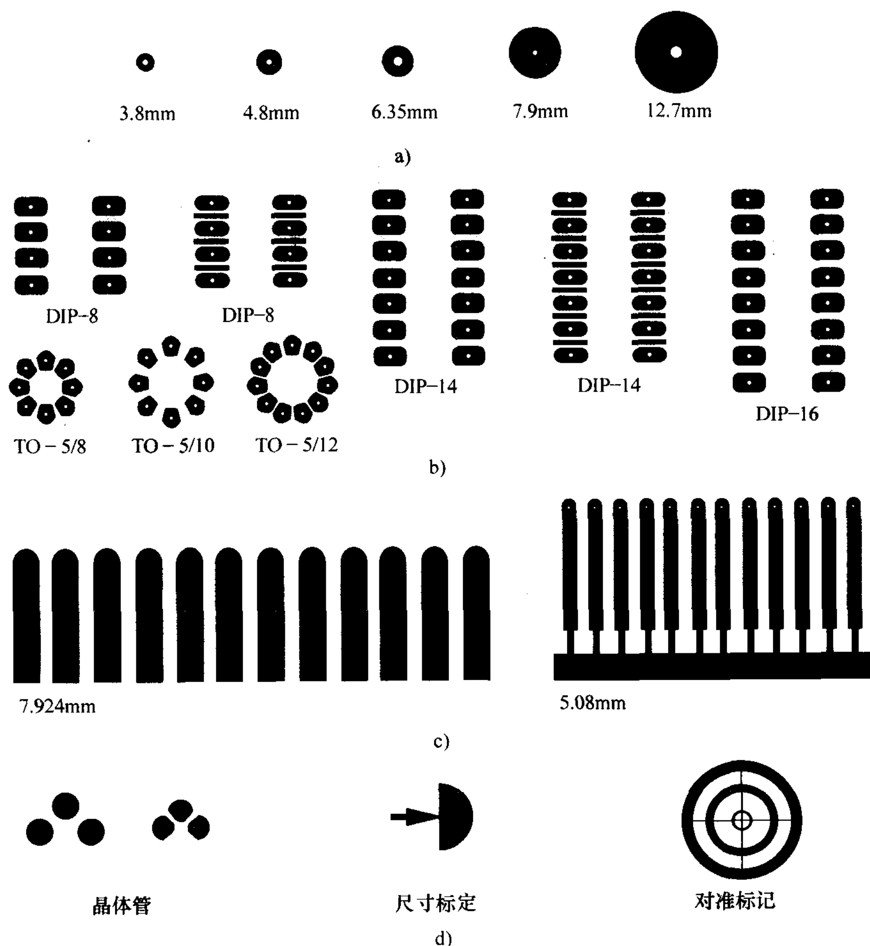


图 5-3 2:1 布线图中常用的特殊焊盘

a）焊接焊盘 b）集成电路焊盘 c）连接器焊盘 d）其他焊盘

4. 聚酯薄膜

由于聚酯薄膜具有良好的尺寸稳定性，所以它通常被用作布线基底。当温度变化时，其典型数值是 $17 \times 10^{-4}\% / ℃$，而当相对湿度发生变化时，其值是 $11 \times 10^{-4}\% / \%$ RH。尽管多种厚度的聚酯薄膜是可用的，但是为了具备良好的机械稳定性，以防起皱，它的最小厚度应该是 100μm，聚酯薄膜可有预印制网格。

双面板布线图可通过应用“双层布线图”或“三成布线图”生成。

5. 双层布线图

在这种方法中（见图 5-4），印制电路板的元件面和焊接面的布线图分别生成。由于在两个层面之间达到精确的对准是相当困难的，所以这种方法不可取。

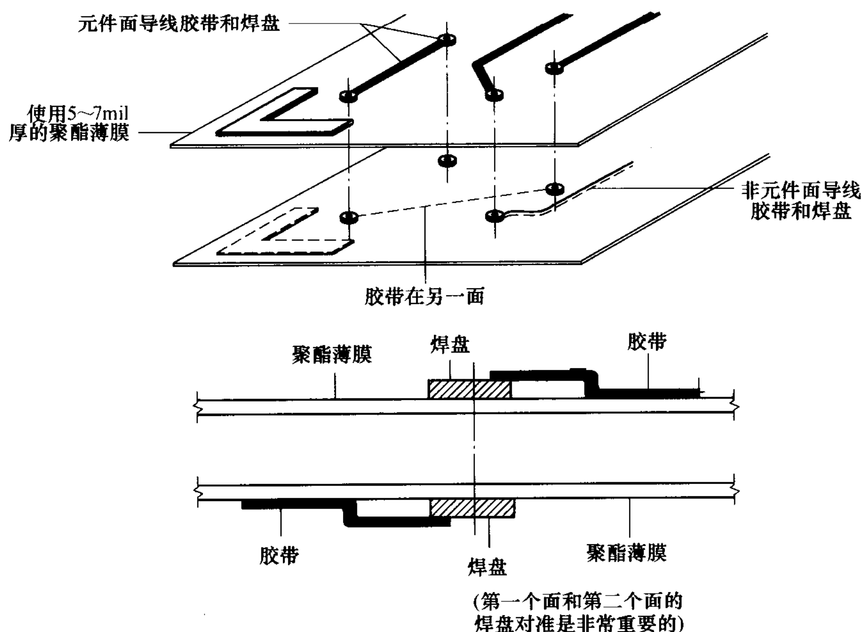


图 5-4　双层布线图法

6. 三层布线图

这种方法解决了常见焊盘的对准问题，它需要准备的布线图分别为：元件面导线；焊接面导线（焊接焊盘，集成电路焊盘，过孔等）；两个面共有的焊盘，以形成第三个层面。布线图的每个层面都需要提供专门的对准标记，以供最后制作原图胶片时对准。

三层布线图法的主要缺点就在于：布线图的任何修改都需要两层甚至三层同时修改，这有时非常麻烦。

5.2.3 粘在透明聚酯基箔上的红色胶带和蓝色胶带

通过使用特殊胶带，就可以在同一透明底片的两面绘制布线图的双面。必须在印制电路板两面都显示的元件焊盘才可以通过使用黑色自粘焊垫生成。而导线图案的绘制则可以通过使用红色透明胶带绘制导线的一面，使用蓝色透明胶带绘制导线的另一面实现。

在产生两张原图底片时，通过使用专门的滤光片来达到分离颜色的目的。例如，具有红色滤光片的照相机会将红色胶带的导线滤去（一般是焊接面），而仅仅显示出蓝色胶带和黑色图案。同样地，蓝色滤光片将蓝色胶带的导线滤掉（通常为元件面），仅有红色胶带和黑色图案可见。对双面板而言，这种方法实现了绝对的对准，并且也是最为简便的准备方法。

5.3 布线图设计准备的一般原则

布线图设计准备无论使用那种方法，都必须遵循一些基本的原则。虽然这些原则是专门用于手工布线准备的，但是，像焊垫型号数量的最佳化、钻孔直径、布线长度等，这些重要的标准在自动化布线准备程序中也同样有用。

在印制电路板元件库中，诸如集成电路和连接器等主要部件仍然是以英寸为单位的网格建立的，但是当今存在一种趋势，那就是以毫米为单位的网格建立，尤其是对于新连接器而言。因此，需要把英寸转换为毫米，特别是对于焊盘、孔、导线和间距时，表 5-1 给出了一个计算图表，可以帮助进行必要的换算。

表 5-1 mil 到 mm 的计算图表

焊盘		孔		导线		间距	
mil	mm	mil	mm	mil	mm	mil	mm
50	1.3	28	0.7	8	0.2	8	0.2
62	1.6	32	0.8	10	0.25	10	0.25
80	2.0	40	1	15	0.4	15	0.4
100	2.5	48	1.2	20	0.5	—	—

5.3.1 导线的定位

一般情况下，导线的定位基本上是一面沿 x 轴方向，另一边沿 y 轴方向，这样可以获得一个具有最小过孔的非常整齐的布线图案。

导线的拐角应该制作成45°或90°或30°/60°，这是数字电路布线设计主要采用的角度。而对于模拟电路板，通常被制作成弧形弯曲。图 5-5 给出了布线图中

首选的胶带布设角度。尽管导线可以按任意角度布设，但是，以同样的角度平行布设则更为一致，这一点非常重要，因为它可以确保可用空间的最佳利用，同时具有很好的导线间距。

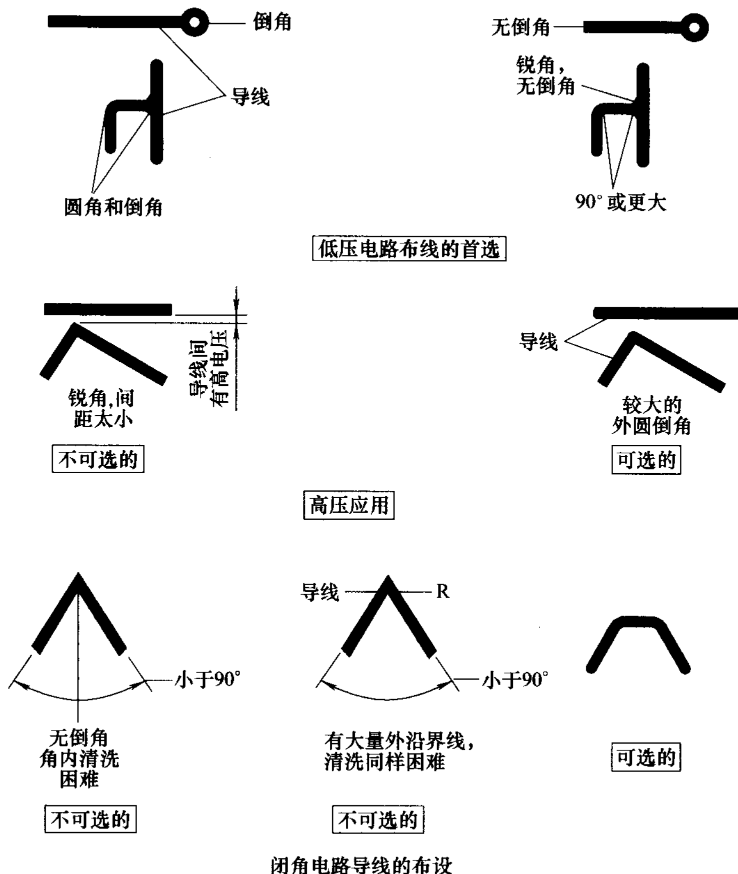


图 5-5　导线的形状——导线的拐角

5.3.2　导线的路径选择

以下是关于导线路径选择的原则：

1）即使在电路图中有足够大的可用空间，且导线能够按任意方向放置，也必须按照最短的连接长度布设导线（见图 5-6），这一点对于高频印制电路板尤为重要。一般来说，好的路径选择方法是：导线的起始和终止在一个焊盘或另一个焊盘上。但是，如果这样做会导致导线长度的增加，那么就可以把它同另一导线相连，以此作为它的终止。

2）导线拐角的最小角度是 60°。如果拐角小于 60°，那么在生产过程中就会带来蚀刻问题，会蚀刻掉多余的材料。如图 5-7 所示。

3）导线必须以相同的角度平行布设（见图 5-8），以确保一致性，这样可以消除导线间距的变化。

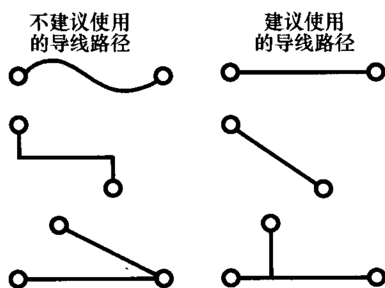


图 5-6　导线路径——使导线长度最短

4）当一根或几根导线需要穿过焊盘或其他导线间的区域时，导线间距必须平均分布。当导线被垂直放置到一条窄小的通道上时，可以获得最大的间距。图 5-9 给出了如何最大限度地利用可用空间。

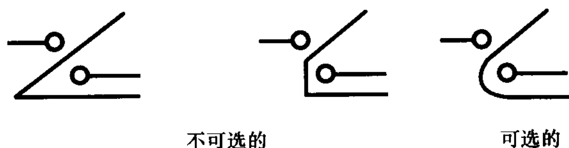


图 5-7　导线路径——避免尖锐内角的形成

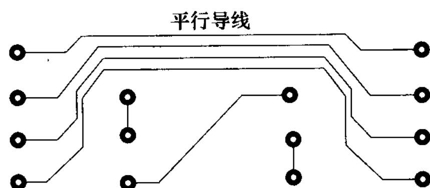


图 5-8　导线路径——平行布设

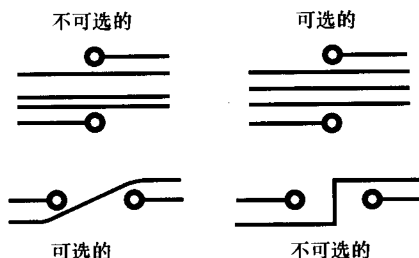


图 5-9　导线路径——最大限度地利用可用空间

5）间距紧密的平行导线会带来生产问题。为避免此情况的发生，导线应尽可能广泛地分布于可用区域内。

6）务必确保导线在同一点处没有不必要的分支（见图 5-10）。还应避免在同一焊盘处导线组数过多。

7）通常，应根据专门信号或线路所要求的载流量来选择导线的宽度。但是，最好采用标准的线宽，同时也应保持所有线路图中使用的导线宽度的数量达到最小。推荐使用的导线宽度是：

① 信号线：0.2 ~ 0.3mm

② 电源线：0.762 ~ 1.5mm（根据目前的情况）

③ 地线：1.0 ~ 2.0mm（根据目前的情况）

8）地线的宽度通常应大于电源线的长度。一般，当温度上升达到最大值 20℃时选择导线的宽度。

9）如果有其他路径可供选择，那么导线也必须避免在焊盘之间通过，以免导致焊盘和导线间的间隙过于狭窄，这可使制作阶段的报废率达到最小。图 5-11 列出了一些较好的路径模式。无论哪种模式，其目的都应是减少路径长度。

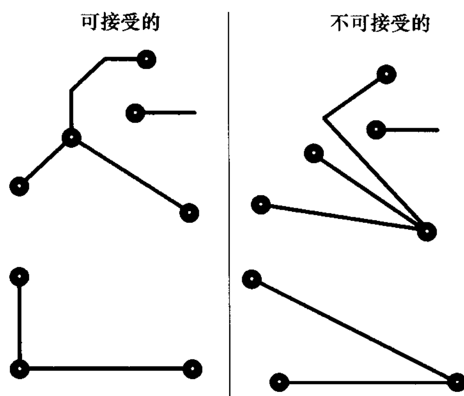


图 5-10　导线路径——最大限度地利用可用空间

10）导线路径应在印制电路板各层之间均匀分布。例如，在双面印制电路板中，应该在焊接面和元件面之间均匀分布。路径密度的均匀分布有助于确保制作过程中电镀的一致性。

Scaminaci（1994）指出：系统噪声的主要原因源于布线图设计阶段。遵照以下原则，可使系统互连噪声达到最小：

1）要求严格的信号网路要布设在同一个信号层，并保持导线尽可能短，应避免改变信号网路的布设层。层间信号的传递会引起反射并降低线路阻抗。

2）使相邻信号层的路径彼此成直角（相互垂直）。

3）各信号层间通过地线层或电源层彼此隔离。

4）各信号线间通过地线隔离，将会减小噪声，但也会略微降低导线阻抗。

5）平行信号线的布设应尽量拉开距离。

6）差分导线对的长度必须一致。

7）空间信号线与线路管道一样，与连接器焊盘保持最大的距离。

8）将轨迹直接与连接衬垫相连，而没有分支线。这可以防止反射的阻抗变化，形成共同的连接器接点。

9）利用曲线或 45°弯来避免产生局部线路反射。

10）应尽量减小通孔。位于无线电网的每一个电镀通孔都会增加路线的分布电容。如果通孔无法避免，钻孔的大小应和导线的大小一致，这将降低制作成本并保持相同的纵横尺寸比。

11）防止通过连接器引脚区域走线宽度的改变，如果可能，使用同一走线宽度进行布线。

12）尽可能使用最宽的路线以减少直流电阻。

13）信号表层的路线宽度和铜的厚度是最难控制的，仅仅是临界信号可以在外层传播。

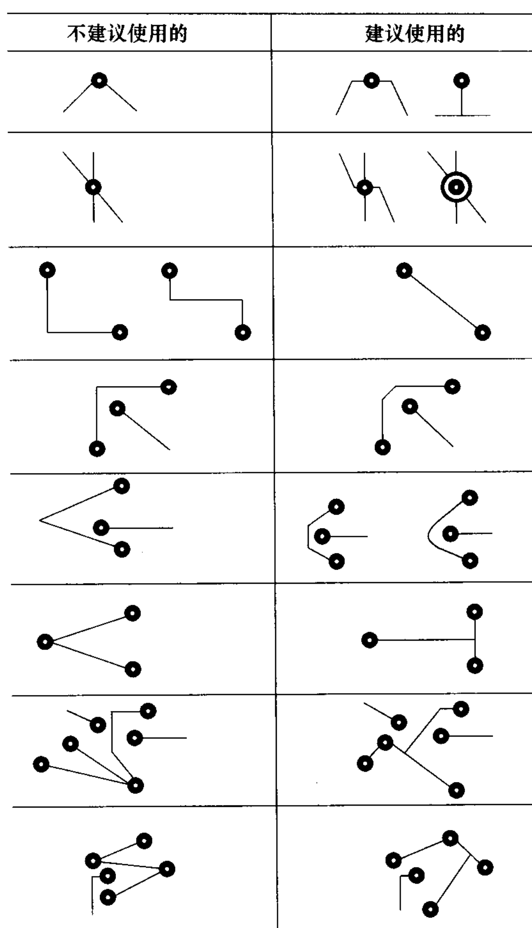


图 5-11　较好的导线路径模式

14）具有焊接信号轨迹的衬垫应在其连接处裂开。

作为参考，应记住以下几点：

1）为信号层提供一个阻抗可控的、实心的接地面或电源面，并以此为参考面。

2）保持地线返回到公共的逻辑地。

3）多个接地面和电源面为电流处理提供了支持，而且低电感的接地回路可使接地反射达到最小。

4）在连接器区域内使用最小直径的焊盘间隙，以便得到最大的覆铜面积。

5）整个接地面和电源面应背对背放置，且具有最小的电介质间隙。这样就形成一个电容器，过滤掉电源的高频噪声。

6）连接焊盘应该能减轻受热。

5.3.3 导线的间距

确定导线间所要求的最小间距的基本原则是：当无法避免时才可考虑间距问题。印制电路板制作过程中的规范在间距问题上起着重要作用，其中，主要是电镀过程必需的间距。例如，在电路图形的电镀过程中，面板电镀时，导线宽度会增加，最多至 125μm；而由于侧蚀的原因，导线宽度也会减小相同的大小。其宽度的变化取决于减成法印制电路板制作中铜箔的厚度和所使用的图像转移的方法，如：湿膜抗蚀法、干膜抗蚀法、丝网印制法等。

为了避免由于绝缘性能不好而导致的导线间电压闪络的可能，需要指明电压所需的最小间距。该间距必须能够适用于所有情况，包括在布线图生成和印制电路板制作过程中出现的最为严重的偏差。

最小间距的规范标准由各个国际机构制定，如 IPC（电子电路互连与封装协会），IEC（国际电工委员会），MIL（美国军用标准）和 UL（保险商实验所）。作为一个导则，间距规范应按照印制电路板的应用海拔高度在 10000ft（3048m）以上或以下，以及印制电路板上是否使用保护膜而区别对待。图 5-12 为 MIL 275B 中所规定的最小间距要求。

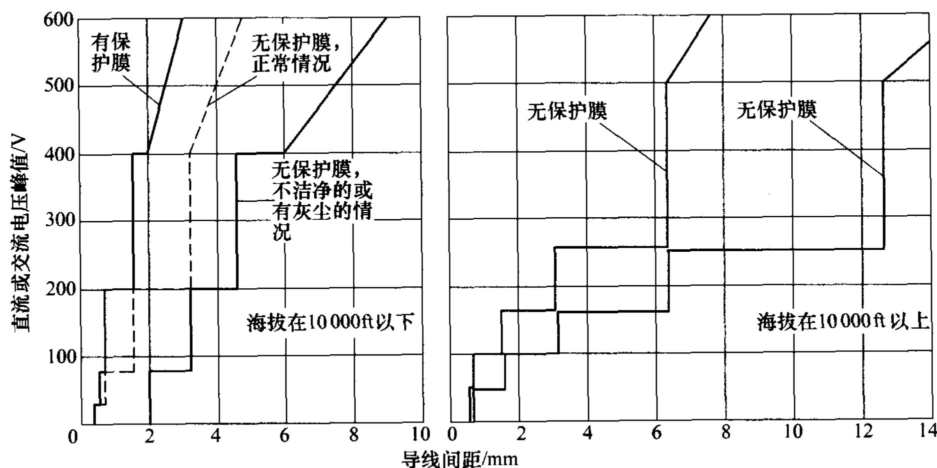


图 5-12　MIL 275B 中所规定的最小间距要求（经 Bosshart 同意重绘，1983）

5.3.4 孔径与焊盘直径

5.3.4.1 孔径

元件的引脚应该插入一个适当直径的孔中，这一点是最基本的。孔必须允许元件插入，而又不是太紧。同时，孔必须足够大，以使在波峰焊接时产生气体溢出，否则在焊接点和通孔内部可能会形成气孔或砂眼，从而降低了可靠性。

同时，在印制电路板上不同孔径的数量必须达到最少。因此，必须使孔径的数量最佳化，否则会增加生产成本。为达到满意的焊接效果，已完成的孔和电镀孔的直径与元件引脚的标称直径之间应有0.2～0.5mm的间隙。计算钻孔直径应该将公差考虑在内，分别是：

标称钻孔直径 <0.8…… +0.10mm

标称钻孔直径 >0.8…… +0.13mm

以此作为导则，标称钻孔直径通常要比元件引脚直径预计大0.2～0.5mm，钻孔直径已被标准化为0.8mm，1.0mm，1.3mm，1.5mm和1.6mm了。

电路复杂的程度主要决定了导线的密度。每个公司都有自己的标准，例如，表5-2为按复杂性给出的印制电路板（钻孔）的分类。

表5-2　根据复杂性进行的印制电路板的分类（经Leonida同意重绘，1981）

（单位：mm）

项　　目	单面板		双面镀通孔板	
	通用	专用	低密度	高密度
D=最常用的孔径	0.8～1.5	0.8～1.5	0.8～1.2	0.6～1.0
铜和直径	D加上1.0～2.0	D加上0.8～1.3	D加上0.4～1.0	D加上0.3～0.6
最小路径宽度（不考虑有限长度）	0.8	0.5	0.35	0.15
两个相邻导线间的最小公差	0.6	0.4	0.3	0.2
孔位置的整个公差	0.1～0.2	0.1～0.15	0.05～0.1	0.05～0.075

值得注意的是，即使列出了四种不同的标准，每种之间也没有明显的分界，一个印制电路板可以根据不同的因素归为不同的类别。

为安装带引脚的组件所钻的孔和通孔必须是当前的尺寸。如果钻孔为镀通孔，那么电镀的厚度不应该包含在当前的尺寸之内。在一些标准中指定了常用的钻孔直径，诸如0.4mm、0.5mm、0.6mm、0.8mm、0.9mm、1.0mm、1.3mm、1.6mm和2.0mm等。通常，钻孔的最小尺寸约为板子厚度的1/3。例如，1.6mm厚的板子，最小孔径为0.6mm。对于标准的双列直插封装而言，常见的钻孔尺寸是0.8mm。关于孔径的一些基本原则是：

1）印制电路板上孔径的数量必须保持最少。孔的大小可以在给定的范围内变化，从而使所用的孔径达到最少，但是要切记，大于给定孔径范围的孔会带来焊接的困难。

2）如果完成的孔和电镀的孔的直径与元件引脚的额定直径之间的间隙为0.2～0.5mm，则通常可以得到满意的焊接结果。

3）孔径=有效的引脚直径+孔的定位误差（PTH）+0.2mm。

孔的焊盘或连接区的大小取决于连接区是否必须支撑带引脚的元件或者是

否需要电镀。假设用 D 表示连接区或焊盘的尺寸，d 表示钻孔的直径，那么要求：

非电镀孔：$D/d \geq 40\text{mil}$（1mm）

镀通孔：$D/d \geq 20\text{mil}$（0.5mm）

板子的材料对焊盘和孔的大小起着重要的作用：

$D/d = 2.5 \sim 3.0$（苯酚基板上的非电镀孔）

$D/d = 1.8 \sim 3.0$（环氧基板上的非电镀孔）

$D/d = 1.5 \sim 2.0$（镀通孔）

如图 5-13 所示，用于安装穿孔元件的焊盘或连接区的阻焊膜，至少必须覆盖焊盘的边缘 0.25mm。

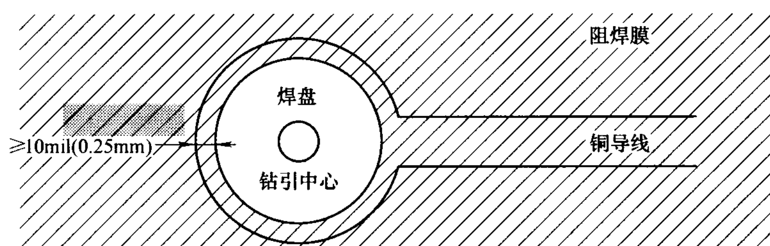


图 5-13　阻焊膜与带引脚元件的焊盘之间交迭的最小尺寸
（经 Haskard 同意重绘，1997）

表 5-3 列出了电子产品中常用元器件的引脚直径和间距。同时，还列出了使用这些元器件所需要的最小标准孔尺寸。

表 5-3　典型的元器件引脚尺寸（经 George 同意，1999）（单位：in）

元器件类型	引脚间距	引脚厚度	标准孔尺寸
1/4W 电阻	0.400	0.023	0.028
1/4W 碳膜排电阻	0.400	0.025	0.028
1/2W 碳膜排电阻	0.600	0.032	0.035
1W 碳膜排电阻	0.900	0.041	0.052
2W 碳膜排电阻	1.000	0.045	0.052
小陶瓷电容器	0.100	0.020	0.028
大陶瓷电容器（>0.1μf）	0.200	0.020	0.028
小镀银云母电容器	0.150	0.015	0.028
小晶体管（TO-92）	0.050	0.018	0.028
功率晶体管（TO-220）	0.100	0.036	0.042
T-1 3/4 LED	0.100	0.028	0.035

（续）

元器件类型	引脚间距	引脚厚度	标准孔尺寸
小石英晶体	0.200	0.018	0.028
集成电路	0.100	0.023	0.028
集成电路机械管座	0.100	0.020	0.028
集成电路焊接插座	0.100	0.025	0.028
管座/跨接线	0.100	0.035	0.042
大型管座	0.156	0.063	0.086
D 型连接器	0.109	0.035	0.042
#4 通孔	N/A	0.124	0.125
#6 通孔	N/A	0.150	0.156

5.3.4.2 焊盘直径

焊盘的作用是将部件插头和电路板上的铜导线连接起来。焊盘的孔必须足够大，以便于引脚尺寸、孔尺寸、孔位置以及引脚位置的改变。焊盘必须足够大，从而确保在板子表面上孔的四周有一些铜箔。因此，完成孔的焊盘直径大小对于可靠的焊接是非常重要的。一般地，在有镀通孔的印制电路板中，焊盘环的宽度应在 0.3 ~ 0.6mm 之间。对于无镀通孔的印制电路板而言，由于没有通孔电镀带给焊盘机械应力，所以焊盘应更大一些。但是为了避免由于钻孔位置偏差造成环的断裂，必须提供一个足够大的焊盘。另外，需重点考虑的还有焊盘的尺寸和连接导线的宽度。导线的宽度通常应小于焊盘的直径，较好的约为 1/3，如图 5-14 所示。

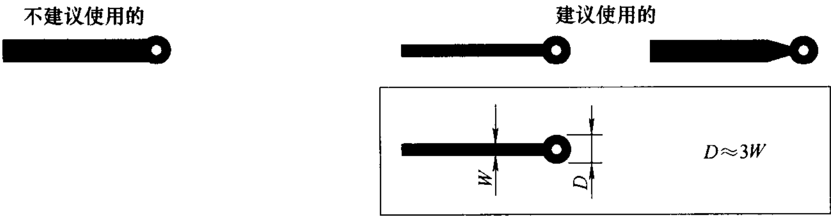


图 5-14 焊盘直径和导线宽度

图 5-15 给出了焊盘的选择方法以及一定范围内钻孔直径适用的焊盘的最小值。例如，对于 0.85 ~ 1.3mm 的钻孔，可用 2.54mm 的焊盘。但是，对于这个钻孔直径范围，1.98mm 的焊盘仅仅满足了最小标准，此焊盘尺寸只用于手工布线图的生成。以下是关于焊盘直径的重要规则：

1）在带有镀通孔的印制电路板中，环的宽度（Masaoka 等人，1993）至少

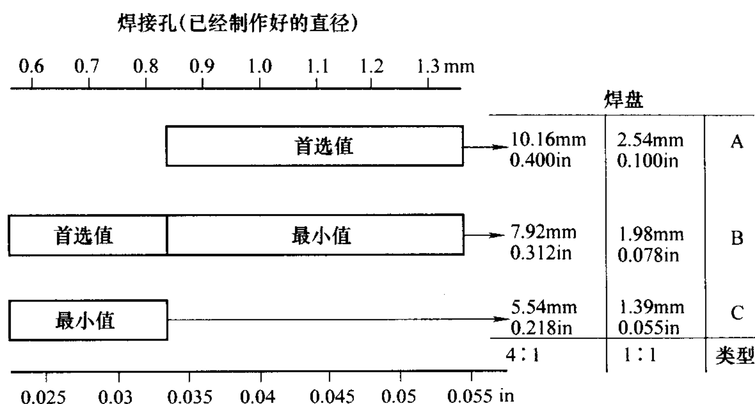


图 5-15　一定范围内的孔径适用的焊盘的最大值和最小值[㊀]

应为 0.5mm，但在无镀通孔的印制电路板中，由于没有通孔电镀所提供给焊盘的机械应力，所以环应更宽一些。

2）通常，焊盘的直径约为元器件引脚直径的三倍。

3）焊盘通常被准确地放置于网格交叉点的中心处。

4）导线宽度应小于焊盘的直径。

5）为得到均匀的焊接点，钻孔四周的图形应尽可能保持同一标准。

关于焊盘大小的主要问题在于焊接性和可制作性。焊接性是技术的问题，而可制作性关注的是当在焊盘上钻孔时，焊盘会不会断裂的问题。如果钻孔稍微偏离了中心，焊盘的一边可能会损坏，这可能导致电路断开。焊盘孔环的标准要求是 5mil，这意味着在孔的四周必须是 0.005in 的环宽（也就是说，一个 28mil 的孔需要一个 38mil 的焊盘），出于焊接性的考虑，建议比这个尺寸（10mil）稍大一些。例外的是，可以使用 2.5mil（也就是说，20mil 的孔用 25mil 的焊盘）的孔环，但通常不建议使用（www.leonardo.caltech.edu）。

球栅阵列封装（BGA）、密距球栅阵列封装（FBGA）和其他芯片级封装（ACSP）需要专门斟酌从而达到成功装配。与带引脚元器件的封装相比，其几何形状不断缩小，加工边缘也在缩小。因此，有必要正确的布局焊盘，以达到可靠的焊接结构。传统的 BGA 封装为球栅结构，具有 1.0mm 或更大的球栅间距。FBGA 封装结构与 BGA 相同，其球间间距为 0.8mm 或更小。在这两种情况下，使用基板插入将集成电路 I/O 端子重新分配给焊接球栅。建议按照 IPC-SM-782A“表面贴装设计与焊盘结构标准”的要求进行印制电路板焊盘布局。表 5-4 列举了对于不同组件建议使用的焊盘尺寸和公差。

㊀ 本书原文此处似有误，“最大值”应改为“推荐值”。——译者注

表 5-4　建议使用的 BGA 标称值（经 Micron 科技有限公司同意使用）

（单位：mm）

BGA 球间距	BGA 焊盘尺寸	球直径[①]	印制电路板焊盘尺寸	铜箔厚度	方形孔径
1.25	0.60	0.75	0.60	0.127	0.60
1.00	0.33	0.40	0.33	0.102	0.33
0.80	0.33	0.40	0.33	0.102	0.33
0.75	0.27	0.35	0.27	0.102	0.27

① 球直径为安装和回流焊接之前的测量值。

5.3.5　方形连接盘/焊盘

方形连接盘/焊盘是用来设计元器件极性和方向的一种常用方法。极性元器件中的正极或阳极引脚均有标志，方形连接盘专门指明了正极引脚应被放置的位置。而对于带有负极或阴极引脚标志的元器件，如二极管或发光二极管，方形连接盘指出了标有负极的引脚应放置的位置。

类似地，方形连接盘常被用来指明多引脚元器件中标有“引脚 - 1”的引脚应放置的位置，这方便了确认面板表面元器件放置的正确方向。

在集成电路中，方向标志通常为集成电路中的“引脚 - 1”，电路板中用丝网标识或符号来进行相应的方向标记。

5.4　布线图生成总则

5.4.1　导线与板边的预留区域

在 1:1 的比例下，走线和板边的距离不能大于 0.5in（12.5mm），但也不能任意接近板边，如果可能，应至少预留 0.10in（2.5mm）。这为电路板剪切为特定的尺寸预留出了所需的必须空间，否则在以后的组装中，走线的一部分或全部可能会被切掉或短缺。

如果使用金属或电的插件导轨，那么插件导轨的边缘到最近的导线边缘的间距应为所要求的标准空隙 1.25mm（0.05in 或更大）。如图 5-16 所示。

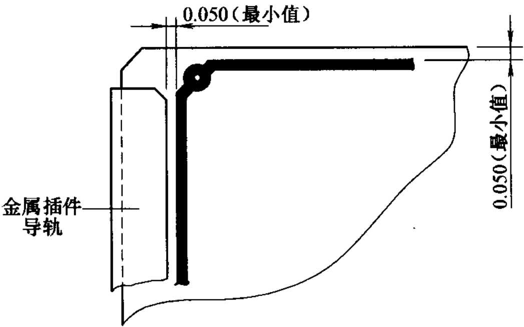


图 5-16　插件导轨的间距

5.4.2 焊盘中心孔

焊盘中心孔通常保持打开状态，即不被衬带覆盖。只有这样，它们才能在布线图设计时作为对准标记，在钻孔时作为中心点。

5.4.3 导线与焊盘的连接

为了确保焊接连接处的可靠性，孔周围的图形应保持同一标准，并且要尽可能的小，从而使得焊接点均匀，这一点是非常重要的。即使衬带蠕变，焊盘与周围图形的交叠部分也应无间隔。图 5-17 列出了一些错误焊接的例子和改进的建议。

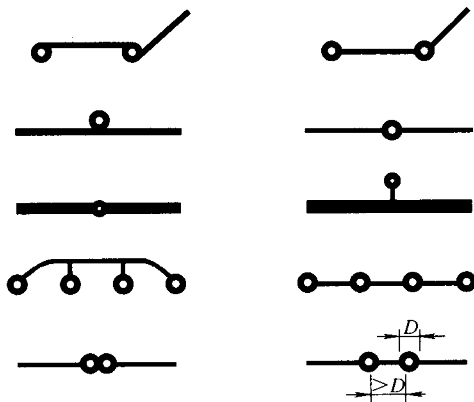


图 5-17 可靠焊接点的设计原则

5.5 胶片生成的准备

根据电路的设计将元器件和各种连接器布局在布线图中，就为原图胶片的生成作好了准备。原图胶片可以是正片也可以是负片，最后用于涂敷在印制电路板上的光阻膜或感光层的直接曝光。为确保高质量的印制电路板，原图胶片必须具有高的尺寸准确度、清晰度和耐磨性。不好的原图胶片会严重地影响随后的每一步印制电路板的制作。通常，原图胶片的最终质量取决于化学制剂、胶片感光乳剂和曝光装置，如照相机。

5.5.1 照相胶片

照相胶片一般包含两层：感光乳剂和基底（见图 5-18），感光乳剂约厚 5 ~ 10μm，具有可靠的照相胶片特性。未曝光时，它含有光敏卤化银，为稳定的卤化物或合成的悬浊液。

基底材料可以是醋酸纤维、聚酯或玻璃，厚度为 100 ~ 250μm。胶片尺寸的稳定性主要由基底材料决定。照相胶片可以是卷状、片状、带状或卡片，可以是已安装好的或未安装好的，没有尺寸限制。

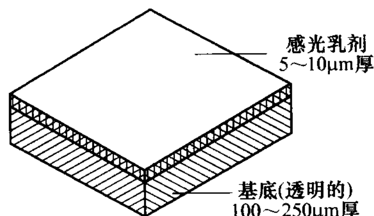


图 5-18 照相胶片的组成

由于聚酯胶片既有较好的尺寸稳定性，

同时又便于处理和加工，所以它常被用于印制电路板技术中。要达到最大程度的尺寸稳定性，比如在微电子应用中，可使用玻璃胶片。如果对尺寸稳定性的要求不是很严格，那么可以使用醋酸纤维胶片。

原图胶片的尺寸稳定性随温度的变化、相对湿度的变化、加工的效果和老化而发生改变。通常用 ppm（$\times10^{-4}\%$）来表示尺寸的变化。图 5-19 列出了由于温度变化引起的尺寸变化，而图 5-20 说明了由于相对湿度改变带来的尺寸变化的典型值。

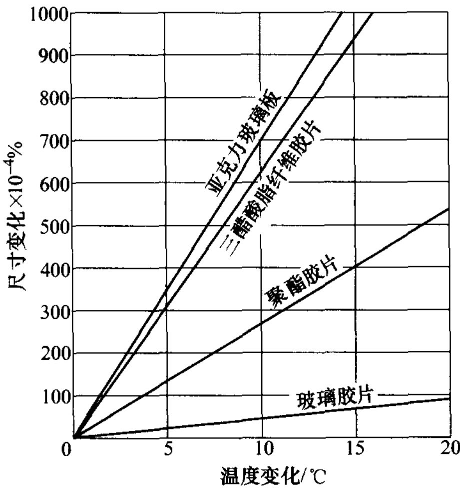


图 5-19　由于温度变化引起的胶片尺寸变化（经 Bosshart 同意重绘，1983）

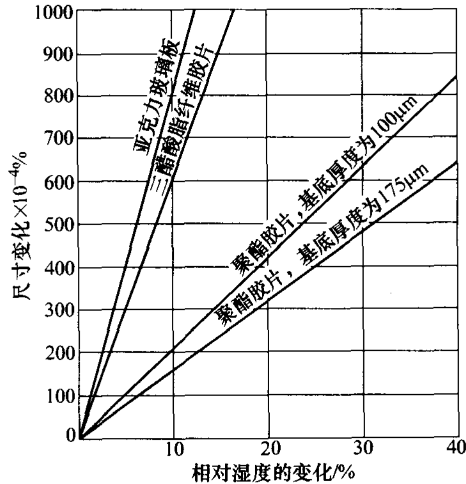


图 5-20　由相对湿度改变引起尺寸改变的典型值（经 Bosshart 同意重绘，1983）

湿度≥60%时会破坏图像。如果相对湿度小于 30%，会影响感光乳剂的脆性。因此，周围空气中湿度的最佳值为 30% ~40%。表 5-5 列出了适用于不同类型胶片的相对湿度的范围。

表 5-5　建议使用的不同类型胶片相对湿度的范围　　（单位:%）

感光层	基底类型	建议使用的相对湿度
缩影胶片		
银-明胶	纤维素酯	15 ~40
银-明胶	对苯二酸酯聚乙烯	30 ~40
普通		
银-明胶	纤维素酯	15 ~50
银-明胶	对苯二酸酯聚乙烯	30 ~50
彩色	纤维素酯	15 ~30
彩色	对苯二酸酯聚乙烯	25 ~30
重氮基	聚乙烯纤维素酯	15 ~30
微泡	对苯二酸酯乙烯	15 ~50

由于布线图通常使用的是扩大的比例，如2:1或4:1，所以原始底片不能直接用于印制电路板的图像转移操作。因此，曝光装置应将其还原到它的实际大小。

制版用胶片可通过相机曝光从布线图获取正像或负像，像可被缩小也可不被缩小。制版用胶片可使用4～8μm的厚酯基底，也可使用薄酯基底。

复制翻胶片可以通过从其他负像布线图中的负像获取，或者从正像布线图中的正像获取。该图像可通过接触曝光转移或照相机无缩小曝光转移。基底的厚度和过程与制版用胶片的相同。

重氮胶片与银明胶型胶片完全不同。在曝光和显影之后，它对于紫外线是不透明的，但对于正常的光线是透明的。因此，曝光时不需要暗室。胶片用相机或接触曝光装置来曝光，通过氨蒸气来显影。显影不需要任何化学槽，并且胶片很快会变干。

重氮胶片的尺寸稳定性与银-明胶胶片相同。它可以转移为透明的琥珀形状或深紫红色，具有厚的或薄的酯基底。由于它看上去是透明的，所以可用此胶片来确保孔和焊盘的精确对准。

照相材料的分辨率是指显影一组相互平行的带状导线时，可以保持每个带状导线单独分辨的能力。这些带状导线彼此很接近，以每毫米的距离成行排列。典型的测试分辨率的测试图样如图5-21所示。

周围环境或存储地点的温度变化会影响胶片尺寸的稳定性。如果胶片长期存储在40℃以上，那么就会降低胶片生成图像的质量。用来存储胶片的适宜温度范围为15～20℃。直接暴露在太阳光下会导致很差的印制效果，会产生污点，并且胶片会褪色。建议用钨和无紫外线的荧光灯对胶片进行周期性的检测。

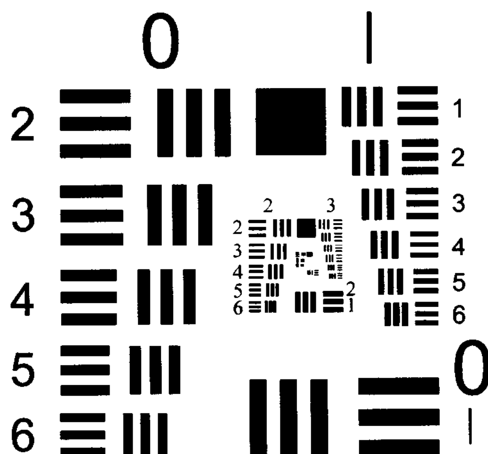


图5-21 测试照相胶片分辨率的典型测试图样

像氧化氮、二氧化硫、硫化氢、臭氧等气体杂质也会与感光乳剂中的银发生反应，导致图像褪色，它们还会溶解基底材料。因此，胶片的储存应远离以上杂质。

胶片处理是非常重要的，因为不恰当的处理方法会破坏胶片的感光乳剂，良好的房间维护和清洁是非常重要的。移动胶片时，仅可拿着胶片的边缘，并且建议使用薄的棉花手套来处理胶片。

5.5.2 相机曝光

相机可用来曝光照相的胶片，达到分离颜色和缩小图像的目的。因此相机应有闪光装置、缩影镜头系统、真空系统和滤色器。

相机应置于操作间或暗室的无晃动支柱上。在照相胶片上生成的图像取决于相机透镜的分辨率和光的强度，曝光的时间长短根据光源而定。表 5-6 给出了根据曝光要求所需的制版时间。

表 5-6 相机和接触曝光实例

光源	光	生成 1:1 图像的制版时间
相机曝光		
氙脉冲	两个 1500W 的灯泡，高 3ft	10s 或更长
白色发光炭精棒弧光灯	四个 30A 的弧光灯，高 3ft	20s 或更长
钨/钨卤灯	四个 750W 的灯，高 3ft	28s 或更长
接触曝光		
钨灯	6V、3W 点光源，高 6ft	12s 或更长

上表为里斯型正色菲林 3 型（lith ortho films type-3）制版用胶片的曝光时间。表中的距离是指光源与布线图之间的距离。

相机有两种，它们分别是：垂直缩放相机和水平缩放相机。

相机的工作原理如图 5-22 所示。基本上，水平缩放相机可以完成较大的布线图和胶片，而垂直缩放型相机相对而言需要较小的地面空间，但是复制板的大小应能使一个普通站立的人便利的操作相机。通常，印制电路板技术中需要最大的缩小比例为 4，可用的复制板大小为 45cm × 60cm。

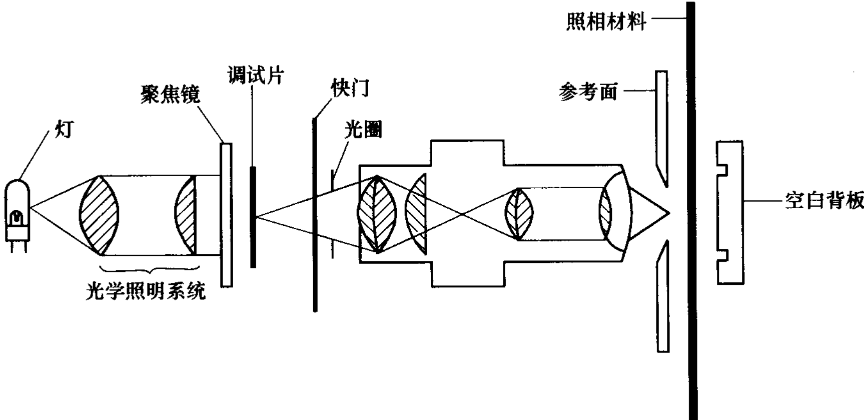


图 5-22 相机的工作原理

相机必须具有准确的曝光时间控制器，具有便于操作的焦距和进行控制的装置。相机还应有平面形透镜，它能免于球面像差，颜色逼真，能生成不失真的图像。

5.5.3 暗室

胶片的处理需要暗室。所有的照相胶片都是感光的，因此，暗室应是不能透光而且有空调的。为了确保能满足尺寸稳定性的要求，暗室里的温度和湿度应保持在可允许限度内，同时应保证照明的安全。一般而言，暗室的温度保持在 20℃ ±2℃，相对湿度约为 55% ±5%。暗室里稍高的大气压阻止灰尘由门和窗进入。暗室内部和四周应避免发生震动，这一点须在建筑物设计阶段就考虑到。

暗室中应有储存胶片和化学制剂的单独设备。操作间和胶片干燥装置应提供流水设备。最好应有两个流水槽：一个用来冲洗胶片；另一个则用来洗手等。典型的暗室设计如图 5-23 所示。

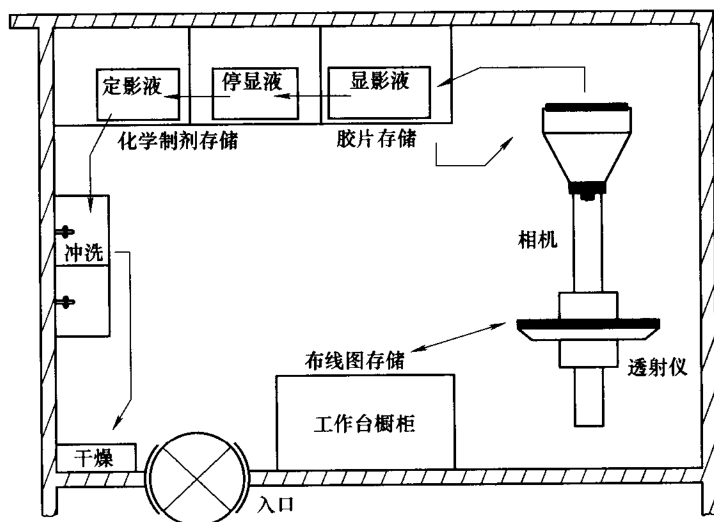


图 5-23　典型的暗室设计

胶片的操作间应使用经过滤的安全光线来照明，安全光线的类型根据所使用胶片的类型而定。安全光线应对胶片的感光乳剂不敏感。一般情况下，使用 15W 的黄光、橙光或红光。它必须被置于距离胶片操作区域至少 120cm 以外。

照相胶片基本包括两层：感光乳剂和基底。感光乳剂是光敏卤化银，感光的化学物质被照在表面上的波长为 360 ~ 680nm 光还原或氧化，波长的范围决定着照相胶片的感光性。在可见光范围中，黄、橙和红光光谱不会影响胶片的感光乳剂。因此，这些有色光被用作暗室的安全光。

暗室操作中一些有用的工具是：

1）用来盛放显影液、停显液和定影液的大小适宜的盘子，它们可以是塑料的，也可以是不锈钢的。

2）胶片加工过程中用来处理胶片的胶片钳。

3）定影液温度计。

4）暗室闹钟。

5）用于储存不使用的胶片的冰箱。

6）布线图存储空间。

5.5.4　胶片显影

因为胶片会受任何自然光或明亮光源的影响，所以胶片的处理只能在暗室中进行，暗室使用低强度的安全灯光照明。

布线图被置于相机的透射复制板上，调整相机获得布线图清晰无失真的图像，并使其为1:1的标准比例。如果布线图使用的是彩色衬带（例如，使用蓝色和红色的衬带），用滤色器将其分为两层。照相胶片被标记于相机的胶片平面中，且保持在真空中，然后根据所用胶片的类型，将胶片曝光达到所需时间。取出被曝光过的照相胶片，并按照以下步骤进行显影：

1）明胶中的溴化银对光线很敏感，它可以生成金属银离子和溴离子，溶解于定影液中。



$AgBr \rightarrow Ag^+ + Br^-$

2）曝光后，将胶片浸入弱还原剂溶液中，如称为“显影液”的焦棓酸⊖混合物。被曝光了的部分比未被曝光的部分更容易还原成银。

3）显影后，将未曝光的颗粒物溶解于含有硫代硫酸钠混合物的定影液中。物体明亮的部分在胶片上显影为暗场，这种胶片被称作负片。然后用纯净的蒸馏水或去离子水冲洗胶片，并且用胶片干燥机使其干燥。

显影液→停显液→定影液→冲洗→干燥

1. 显影液

显影液是溶解于蒸馏水或去离子水中的化学物质的混合物。由于要使用专门的胶片，所以显影液的类型要由胶片生产商推荐。显影的时间由化学制剂的浓度和显影液的搅动程度而定，但是，建议在初期按推荐的显影时间进行，当经验丰富以后可以再修正。

2. 停显液

停显液的作用是有效地阻止显影的进程。显影结束后，将胶片从显影液盘中举起，最多不超过3s的时间，使多余的显影液掉落，然后将其浸入到停显液中。

⊖ 焦棓酸，即焦酚（pyrogallol或pyrogallol acid）。——译者注

将胶片浸入到含有稀释的乙酸的停显液中大约 30s，并保持在 20℃ ±2℃ 温度下。停显液也需要适当的搅动。

3. 定影液

为使感光乳剂正确的定影，应将胶片浸入在定影液中。定影液使用以下化学药剂：

1）无水的硫代硫酸钠；
2）无水的焦亚硫酸钠；
3）硼酸（晶体）；
4）醋酸钠（无水的）；
5）硫酸铝钾；
6）蒸馏水。

定影液的温度应维持在 20℃ ±2℃ 之间。定影时间根据定影液的浓缩和搅动程度而定，当类似于牛奶的感光乳剂消失后，可以打开暗室中正常的灯。

4. 冲洗与干燥

定影后，将胶片用 20℃ ±2℃ 的流动水冲洗，直到所有的悬垂固体颗粒溶解掉为止，胶片最好在室温下干燥，约需要 1h 的时间。建议使用 50μm 的多孔滤水器对自来水进行过滤，以避免自来水中的颗粒物质损伤胶片。

5.6 布线图的自动生成

现代科技带来的挑战性和互联网的复杂性使得计算机成为首选的设计工具。基于计算机的印制电路板设计系统便于生成所需的布线图，为印制电路板制造商提供表明电路连接性的资料，如原图胶片以及符合当今标准要求的印制电路板中所使用的不同类型的钻孔尺寸的钻孔信息、阻焊层胶片和组件标志图胶片等。

与手工制造相比，基于计算机的印制电路板设计过程既快速又精确。另外，它还可以提供机动性，这在产品的研发阶段是非常重要的，印制电路板中电路的改变有时是很频繁的，应直到它达到稳定状态为止。

如果对人工布线设计和布线图准备做一个时间分析就会发现，这两项工作所花费的总时间的 40% 是用于布线图草图设计的，而 60% 的时间用在了布线图的准备工作上。因此，自动设计的第一步自然就是消除人工布线的准备工作。图草就是数字信息，该信息输入到绘图仪中，直接生成 1:1 的布线图胶片。第二步就是使用计算机进行布局设计，此过程仍需要设计者的主动参与。最后一步就是最终的布线图设计，该步完全自动完成，无须任何设计者的参与。当今，高性能个人计算机的使用已经使得设计过程发生了彻底的改变，低成本的印制

电路板设计软件已经使布线图的手工设计方法几乎被淘汰。

随着自动化布线设备的使用，极大地减少了印制电路板的设计周期。布线图准备程序被取消了，取而代之的是更快的电路图形数字化的方法。在早期的系统中，使用数字化转换器来为照相绘图仪提供纸带或者打孔卡（见图 5-24），也为 NC 钻孔和 NC 布线提供所需要的纸带（NC 代表数字控制）。数字转换器通常包括光标控制的数字转换器、控制台、磁盘存储系统和快速笔式绘图仪，它们都与计算机相连。数字化是将所有与布局草图有关的信息从图形到数字信息的转换过程，如组件的位置、焊盘的尺寸、导线的排列等。

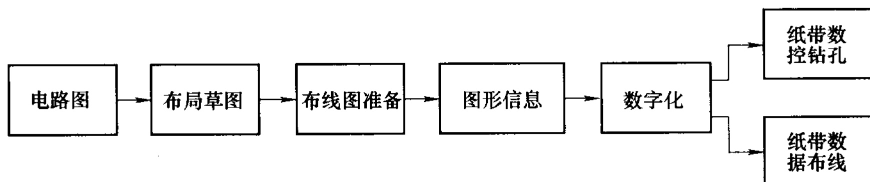


图 5-24　布局和布线图的生成过程：手工布局设计过程

通过手动光标的移动，可以得到 x/y 坐标的脉冲序列，从而确定布局草图中的所有相关的位置。这些脉冲序列被存储在存储系统中。关于孔直径、导线宽度等其他信息可以通过控制台上的键盘输入。图 5-25 为自动布线图的生成方法。来自数字转换器的脉冲序列暂时储存于计算机的储存系统中，然后在计算机处于脱机方式时进行处理，通常根据照相绘图机和数字控制布线设备的需要，以纸带的形式输出。Isaac（1995）阐述了高性能印制电路板的设计工具和控制设计过程。

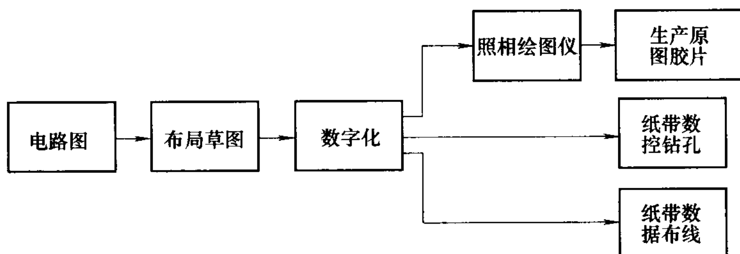


图 5-25　布局和布线图的生成过程：自动布局设计过程

数字转换器的分辨率范围大多为 0.025 ~ 0.1mm，绝对位置的准确度范围为 0.075 ~ 0.25mm。

5.7　计算机辅助设计

计算机辅助设计 CAD 在印制电路板设计者和计算机之间提供了一个界面。

图形终端（视频显示设备）、输入设备和功能键共同为设计者提供了一个自动画板，这促进了生产力的极大提高。近几年中，用于印制电路板设计的软件的实用性也有了显著的提高。

早期的软件程序仅仅是简单的几何图形编辑器，只允许放置元器件和布设导线。但是，它们是交互式的，因此，很容易除去、改变、复制组件和电路块。这些程序有严重的局限性，它们只有 100mil 的网格，并且不允许在板的两面布设元器件。随着软件的发展，已允许将图表信息添加到几何编辑器中，也就是说，能够实现自动布线。当今，由于软件库中不仅包含分立元器件和集成电路的标准引脚图，而且还包含标准产品系列的全面的电子数据（例如 TTL 和 CMOS 封装系列），因此使自动排列和布线成为可能，而且可以较容易地对数字电路进行模拟仿真。另外，也能够自动生成网络数据表单、钻孔尺寸和其他相关数据。

CAD 系统使得电路的多种设计成为可能，与手工设计方法相比具有极大的优势。其中一个重要的优势就是减少了布局的时间，并且在许多情况下，电路修改简单，同时能够提供完全更新的产品信息。

随着 CAD 系统的使用，可实现更高密度的封装。每个电路板上都是包含有大量集成电路的复杂电路，这些几乎是不能通过手工设计完成的。CAD 使得电路图形具有恒定统一的高精度和高品质，尤其是在多层电路板设计中，交互式 CAD 在设计过程中起着重要作用。

5.7.1　系统需求

图 5-26 所示为 CAD 系统的一般框图。CAD 系统的各种组成在以下内容中进行讨论。

5.7.1.1　硬件

CAD 系统包括硬件和软件，其中硬件是可见的组件。根据使用者的要求，硬件设备可以是一个个人计算机，也可以是一个工作站。一般而言，工作站拥有更大的计算能力，且提供了网络环境。在网络系统中，所有的使用者都可以共享元器件库中的公共数据资源和外部设备，如笔式绘图仪和打印机等。通常，个人计算机或工作站的配置都由 CAD 系统控制。不管怎样，以下个人计算机硬件设备对于印制电路板设计包的工作是足够的：

中央处理单元（CPU）：英特尔奔腾 IV 处理器，2.0GHz 的主频或者更高，512KB 的高速缓冲存储器或者更好；

总线结构：集成显卡，3 PCI 和 AGP；

存储器：128MB 266MHz DDR RAM，可升级到 2.0GB（主存储器）；

硬盘驱动器：40GB Ultra DMA 100 HDD，PCI 双通道总线控制；

软盘驱动器：1.44 软磁盘驱动器（3.5in），内置；

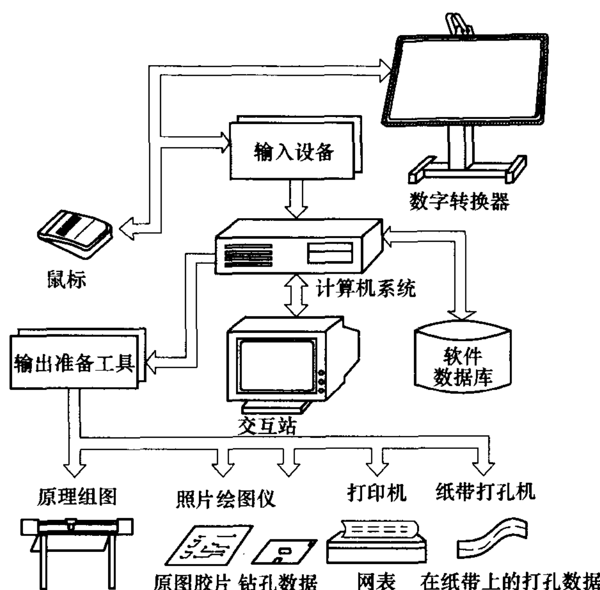


图 5-26　CAD 系统的一般框图（NTTF 注释）

显视器：15in SVGA 数字颜色显视器（支持 1024×768NI⊖分辨率）；

视频控制器：板上有 4MB 或更好的动态视频存储器；

键盘：104 个键的键盘（CHERRY 键盘）；

通信口：2 个 USB 口，2 个串行口，1 个并行口；

CDROM：48X 或更好的 CDROM 驱动器。

以上配置提供了一个良好的印制电路板设计的 CAD 工作站环境。

1）数据输入设备：键盘是最常用的数据输入设备。另外，一些图形输入设备，如光笔、触摸屏、操纵杆、轨迹球、鼠标和数字转换器等，允许操作者以图形形式输入线和点等数据。图形输入设备通常也从菜单中进行选择。

2）数据输出设备：各种各样需求，包括阅览、文件存储、报告、图像、成品图和精密照像工具，都需要硬拷贝。一般，A1 型号的绘图仪能满足大多数要求，但价格昂贵。因此，通常使用 A3/A4 绘图仪。

CAD 系统中使用的机电笔绘图仪有两种基本类型。在平板 x-y 绘图仪中，伺服控制笔或铁笔在固定好的平坦纸上沿两个轴向移动。而在滚筒式绘图仪中，笔或铁笔沿一个轴向移动，而纸在旋转的滚筒上沿另一个轴向移动。在光学绘图仪中，移动的光电传感头将聚焦光束穿过孔传送到光敏胶片或纸上，孔的选择和光电传感头的运动由软件控制。光学绘图仪可生成高分辨率的图像，它也

⊖ NI = Neon Indicator，即氖灯指示器。——译者注

是由 CAD 系统生成高质量印制电路板布线图的主要来源。

打印机常用于生成网络表和材料清单，最常用的打印机是喷墨打印机或激光打印机。

5.7.1.2　软件

选择一个好的 CAD 软件是非常困难的。在专业期刊上发表的许多文章可以帮助人们进行软件的选择。选择一个合适的专用软件需要经过一些考虑，包括软件的性能及价格。一般而言，印制电路板设计需要和应当考虑的因素有：用户界面、学习时间、帮助措施、运行速度等。

由于设计一个印制电路板的第一步是制作原理图，因此有必要分析原理图编辑器的属性，包括获取原理图的程序、软件中提供的数据库、符号比例、网络表生成、在线封装、自动总线连接等。

由于一个良好的布局是形成印制电路板成功设计的主要因素，那么由软件提供的布局工具就非常重要，这样的布局工具能够有助于以最优的方式和最短的可能时间布置元器件。布通率、间距参数的定义、放置控制、矩阵放置、按不同路线重新自动放置，旋转控制，确定最优布局的工具、总线连接的独立检查、在布局过程中查找元器件等就构成了这些布局工具的基本要素。自动和人工联合布线所需的时间、容许能力、布通率、控制程度以及对布线后优化的支持，就形成了评估自动布线工具的原则。

5.8　CAD 系统的基本操作

CAD 设计流程一般开始于原理图或逻辑图，它可能是原理草图，也可能是由获取系统电子转换而成。随后是网络表与物理布局设计的结合，然后根据输入要求设计版面的略图。接着是运用放置技术选择元器件的放置位置。当元器件放置完成以后，就进入设计的布线阶段。

在设计过程中，版面设计完成后，系统可检查设计中的错误，例如间距不正确、焊盘-孔尺寸的比例不当，自动插入器件的间距以及其他问题。具有实时检测设计的功能也许是 CAD 系统的最大优势所在。

当前流行的软件包要比布线图生成所需的功能更多。图 5-27 为设计的各个步骤和制造流程，这些步骤详述如下：

1. 原理图

它提供电路的功能流程和图形表示，包括电气连接（网络）和连接点。原理图包含以下几个方面：

1）离散元器件的符号，例如电阻器、电容器、晶体管以及集成电路，符号要遵循国际标准；

图 5-27　电路板的设计、生产以及组装步骤中，从设计者到生产商所需的广泛信息

2） 输入/输出连接器；

3） 总线；

4） 电源和地符号；

5） 元器件的参考名称；

6） 图形的文字说明。

2. 版面布局

版面布局包含以下几个方面：

1）表面安装或混合零件的组装技术；
2）单面、双面或多基板；
3）PTH 或者非 PTH；
4）元器件、过孔、焊盘、测试盘和元器件引脚的放置；
5）互连走线的产生等。

3. 设计

设计要与版面布局相一致，需注意以下几个因素：
1）走线的宽度要保证能够承载电流密度；
2）走线间要有适当的间距，保证不发生电击穿；
3）正确的热量设计，避免板上出现过热点；
4）寄生元器件的影响，尤其是高频率电路中寄生电容的影响等。

4. 网络表

网络表包含：
1）软件列表的生成，以显示所有互连路径；
2）根据原理图生成的网络表，用来比较检测线路连接的正确性。

5. 插件布线图

插件布线图包含：
1）插件最终版面设计的测试点；
2）元器件的人工检测和插件的视觉检测；
3）由过孔信息和网络表产生的裸板测试信息。

6. 图片工具

图片工具包含：
正片和负片的生成。

7. 钻孔数据

钻孔数据包含：
1）钻孔的具体尺寸；
2）保证钻孔的正确位置；
3）数字控制钻孔机的软件驱动。

8. 组装图

组装图包含：
1）提供机械设计信息，特别是插件材料、厚度、所有的尺寸和形状；
2）核对位置数据；
3）混合零件的尺寸及位置。

9. 自动插件组装

自动插件组装需要：

1）驱动半径、轴线和集成电路插入装置；

2）取出或放置装置。

10. 电路/功能测试

电路/功能测试包含：

1）检测矢量产生；

2）最终的测试和验证。

图 5-28 为 CAD 系统的常规设计流程

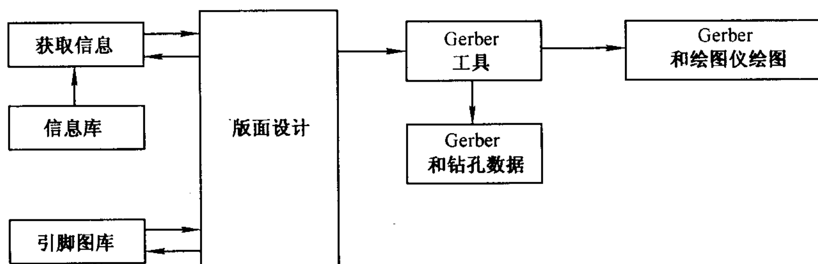


图 5-28　CAD 系统的常规设计流程

5.8.1　版面设计的步骤

在版面设计开始以前，需要有关电路完整而详细的说明，主要包含以下几方面：

1）原理图，包括元器件的详细资料、连接以及边缘连接器的规格。

2）元器件列表，包含元器件的名称、规格、型号和制造商。

3）机械规范，包含板子的尺寸和形状、安装孔、元器件高度受限区域的标注、边缘连接器的位置等。

4）印制电路板规范，单面板、双面板或是多基板，有无镀通孔。

5）图样规范，包括焊盘的类型和尺寸、导线的宽度、间距。

6）电气规范，例如元器件的放置要受到所产生热量的限制，电容或电感耦合，接地面、接线的临界长度等。

7）数据操作。

首先，准备好元器件库，它描述了所需的每个元器件的封装类型，包括外形、焊盘类型、尺寸和焊盘位置。在完整的元器件表单中，应标明所用的每个元器件的封装类型、元器件的名称定位以及在印制电路板上的连接面。连接表单给出了所有点到点连接的精确说明。电路板最终的详细资料列表包含板子的信息和板角处 x/y 的坐标。这些表单数据的正确性，特别是连接表单的极其重要。在许多 CAD 系统中，规定由两个独立的操作员对相同的电路分别准备连接表单。只有在排除了两个连接表单之间的差异后，才有可能进行下一步操作。

正如第 3 章介绍的那样，一个原理图提供功能流程和电路的图形表示。利用 CAD 系统进行印制电路板设计的第一步就是原理图的输入。一个原理图系统包含：

1）电气连接（网络）；

2）连接点；

3）集成电路符号；

4）离散元器件符号，例如电阻器、电容器、晶体管等；

5）输入/输出连接器；

6）电源和地符号；

7）总线；

8）非连接符号；

9）元器件参考名称；

10）文字说明。

电原理图中的这些符号应依照国际标准。

在电原理图获取时，所打开的每个图形都是一个单独的“项目管理窗口”。如果需要同时处理几个图形，则可以把它们全部打开，每一个都有其各自的“项目管理窗口”。“项目管理窗口”用于搜集和组织所有项目需要的资源，这些资源包括原理图文件夹、原理图事件、部件库、部件、输出报告，例如物资清单和网络表。一个项目的管理实际上不包含所有的资源，仅仅是指向项目所需要的各种文件。因此，千万不要删除或移动与任何项目相关的文件，如果删除，这些项目将不能找到这些文件了。

这些项目文件保存为 ASCII 文件（美国信息交换标准码），可通过任何文本编辑器查看。

5.8.2　库的管理

库的管理包含用于印制电路板设计的元器件引脚图的所有文件，版面设计中有建立元器件引脚图图库的工具。库也包含多种符号，可用于电路板的设计。版面设计可含有 30000 多个引脚图。

1. 引脚图

引脚图是指元器件的物理描述，一个引脚图通常包含以下三项内容：

1）焊盘的堆叠结构；

2）界定轮廓，包括元器件的物理轮廓、丝网印制轮廓、装配轮廓、放置和插入轮廓；

3）文本说明。

一个库中的引脚图可以看作是一种绘图展示，可以对引脚图执行多种操作，

例如编辑、保存、复制和删除。

2. 新的库模块的建立

利用库管理器，可以建立新的库模块，把新的或已经存在的引脚图保存在已命名的库中，然后可以选中库列表中的其他引脚图，并将其保存在最新建立的库模块里。也可以建立新的引脚图，把它们添加到库中。

同样的，也可以在引脚图中添加引脚。引脚可以是数字的，也可以是数字与字母联合构成的，并可以放置在任何位置。默认状态下，引脚命名是按照数字顺序，从数字 1 开始，因此必须改变版面设计中引脚的名字，使其与电原理图中引脚的数字相匹配，或者在电原理图库中改变它们。

3. 引脚图中引脚的焊盘堆栈结构的设置

焊盘堆栈结构定义了引脚图中引脚的每一层，给出了引脚每一层的形状和尺寸。可以利用编辑引脚图对话框将引脚图中的所有引脚设计为相同的焊盘堆栈结构。

5.8.3 元器件的放置

当输入的数据已经被计算机完全接受以后，下一步要进行的是元器件的放置。那些早已被设计者确定了位置的元器件，需根据设计进行放置，其他元器件通常按照使整个导线长度最短的方式放置。有两种放置方法可以采用：一种是完全由操作者控制整个操作进行放置；另一种是由自动放置程序完成，必要的时候操作者可以干预。

软件能够放置元器件并进行布线，设置测量单位、网格及间距。经常用自动放置和自动布线工具放置元器件和布线。然而，在许多软件中，许多重要的信号在自动布线之前，必须进行手动布线。电路板的设计中采用以下步骤：

1）利用获取系统由电原理图建立网络表。网络表文件是一个文档文件，它包含了信号和引脚之间逻辑互连的信息。一个网络表文件包含网络、引脚、元器件、连接器、交叉点、非连接符号以及电源和地符号。在建立一个网络表文件之前，要保证项目是完整的、有注解的，并且没有违背电气规则。

2）软件包含合理进行逻辑放置和布线的设计指导原则，也就是说，必须调用网络表进入版面设计，根据指定的参数设计电路板。

3）指定电路板参数。指定电路板的具体全面设置，包含测量单位、网格和间距，确定板的轮廓，定义层堆栈、焊盘堆栈结构和过孔。

4）放置元器件。使用放置工具将电路板上系统设计者确定的元器件进行手工放置，或者使用自动放置工具放置。

5）板的布线。使用不同的布线技术进行板的布线，通常采用推和挤（一种布线技术）的方法，移动走线，为走线腾出空间，也可以采用自动布线方式。

6）板的完成。为了完成设计，系统在自动布线菜单里提供一组顺序执行的命令。这些命令包括设计路线检测、清除设计、重命名元器件、备注、运行后处理程序、建立报告。

5.8.3.1　手工放置元器件

图形显示器根据列表中指定的尺寸显示出板子的轮廓。同时，在显示器的一角显示出所有元器件的轮廓图，包括直接的引脚与引脚之间的互连。

在光笔的帮助下，元器件能够被一个个调用，在显示器上移动到其最适合的位置。光笔是一种手持式电子设备，当它靠近显示器时，其位置就能够被计算机中一种特殊的程序检测到。当元器件被移动时，与它相连的线也同时随之沿直线移动，就像橡皮筋一样。

5.8.3.2　在操作者参与下的自动放置元器件

使用计算机布线，可能会通过自动的方法试图找到最佳的元器件放置位置。相互连接最多的元器件被组放在一起，然而，预先确定了位置的元器件要按照

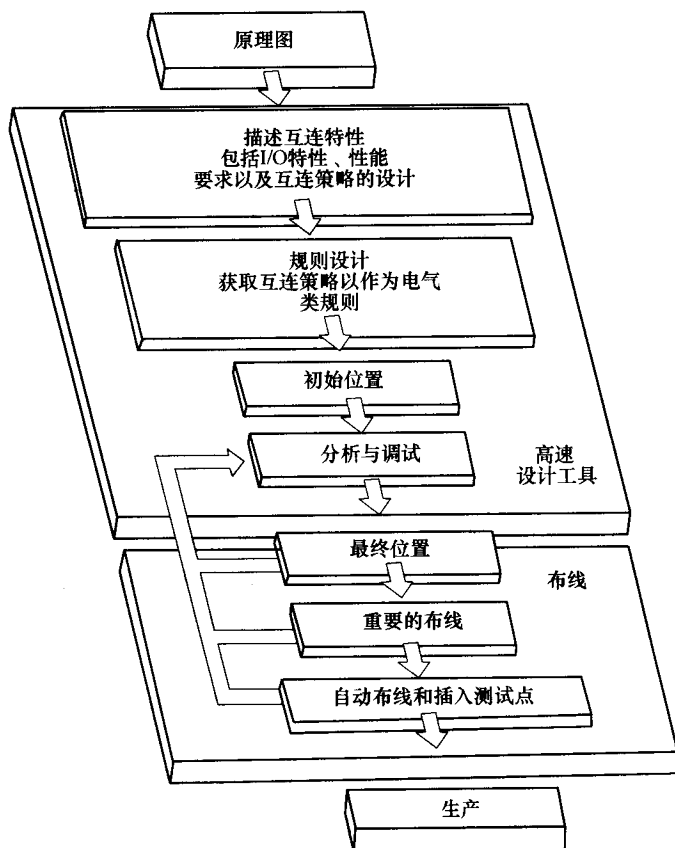


图 5-29　高速设计工具：物理设计流程（经 Isaac 同意，1995）

规定的位置放置。目前，元器件的放置位置是按照最小化导线总长度而定的，这可在显示器中观察到。由于自动放置元器件和布线（见图5-29）需要处理和考虑大量的数据，所以找到一个较好的解决方案非常困难，因此需要设计者的参与，共同努力找到一个满意的解决方案。

大多数自动放置程序或运算规则都会按照严格定义的位置将元器件放置于电路板上。其他系统中允许随机定位元器件，仅仅对元器件主体发生冲突的地方加以限制。所有系统都试图最小化连接路径的长度。最常用的自动放置技术是：

1）交换技术：CAD系统的一个特点就是具有相似元器件之间交换位置的能力，因此可以达到100%互连的可能性。一些自动放置包提供交换部件、门电路和引脚能力，如图5-30所示。

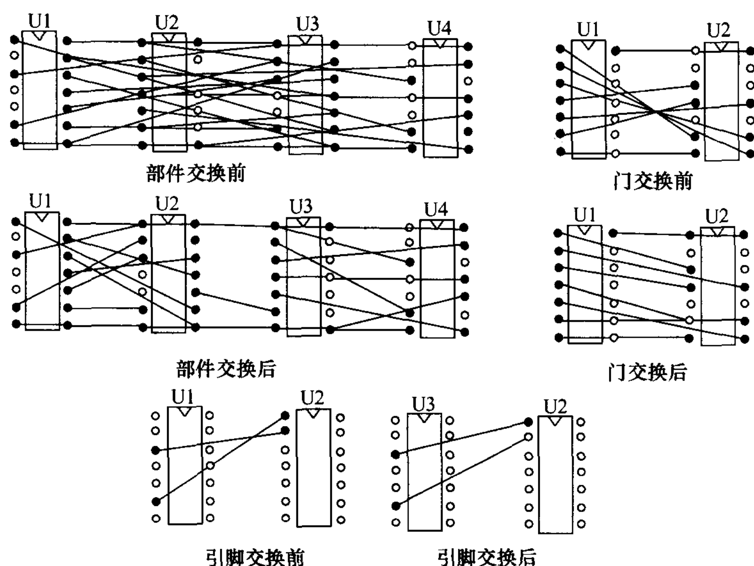


图5-30 CAD系统中部件、门电路和引脚的交换（经Ginsberg同意，1992a）

元器件和引脚能够自动交换，以获得可能的最短线路总长度；元器件、门电路和引脚可以进行交互式交换，以使线路的复杂性最小化，并缩短整个路线的长度。

2）移动/旋转：通常，在设计放置阶段可使用菜单中的一种交互式设计工具，它允许设计者移动和/或旋转设计中任何单独的部件。灵巧的软件包还具有移动和旋转一个完整的组的能力，或旋转一种完全相同类型元器件的能力。

3）分割技术：在这种技术中，设计过程被缩减为一系列分割问题。首先，用一个垂直分界线将一系列元器件的位置划分成左右两部分，然后使用分割程

序交换这两部分的元器件组，使得穿越该垂直分界线的线数达到最少。其次，用一个水平分界线将一系列元器件的位置划分成上下两部分，再使用同样的元器件组交换技术，使得穿越该水平分界线的线数达到最小。此时，每个元器件被放置在左上、右上、左下或右下的一个区域中。在每个区域中再使用这种分割技术，则可得到八个区域，依次类推，直到每个区域只包含一块电路板为止。

4）反复放置：自动化放置的最基本的方法是开始先确定一种放置，应用选择标准获得一个当前放置的“分数”，然后重复操作以下步骤：

① 选择一个新的、合理的设备排列；

② 得到这个新的排列的“分数”；

③ 如果这个新的“分数”优于当前的分数，则使用这个新的排列作为当前的排列，新的“分数”为当前的“分数”。

通过这种技术，设计者能够得到一个更好的元器件放置排列。然而，这个过程非常慢，因为整个选择过程中的每一个新排列都是随机的。

5.8.4 导线的布设

元器件放置好以后，显示器上显示的引脚-引脚之间的互连仍然是沿各个方向的直线相连。现在，自动布线的任务就是找到一个切实可行的印制电路板互连图样。该程序的执行主要按照以下优先顺序：

1）按照连线长度进行分类；

2）从最短的导线开始布设；

3）对所有存在的物件进行分类，例如焊盘和覆铜区域；

4）通过转移导线或其中的一部分使过孔达到最少，从而得到优质的版面设计。（过孔通常是直径较小的镀通孔，用于电路板两面图形的互连，但是它不能用于安装元器件引脚。）

5）不断更新计算机存储的所有信息和显示的图形。

在显示器上，两个不同板面的图形通过不同的光强度加以区分。软件尽量把所有 x 方向的导线放在板子的一面，而把 y 方向的导线放在另一面。

这样的话，计算机很难把所有的导线都放置在板子上，或者可能会布设很长的导线，但是长导线可能会带来不希望出现的耦合现象，因此是很危险的。未能完成的连接（通常为 20%）以虚线的形式表示出来，由于操作者可以很好地纵观整个图形，因此可以参与并完成导线的布设。

5.8.4.1 自动布线

目前，CAD 系统能够处理精细线，各种导线宽度、埋孔和盲孔，以及同一层中不同网格的多种焊盘尺寸。一个好的布线程序应努力通过使用最短的网格实现所有需要的连接。一个好的布线程序应努力通过使用最短的总连接路径以

及最少的过孔数实现所有需要的连接。许多自动布线器仅限于在顶层和底层之间布线，为了实现高效布线，必须同时考虑所有层。自动布线器的专用软件应该能够构架一个智能布线图，同时能够不断地检查间距和连通性。所有这些功能的实现必须同时保证布线和电路成本最低。

印制电路板设计中使用的不同类型/种类的自动布线器包括：

1）走迷宫算法布线器；

2）直线探索法布线器；

3）通道布线器；

4）拆线算法布线器；

5）推挤布线器。

1. 走迷宫算法布线器

在这项技术中，布线器通过向外扩展主网格连接点直到找到次级网格点形成连接，并对所有可能的连接进行比较，从中选择最好的方案（最短的路径和最少的过孔）进行连接。但这种方式通常需要耗费很长的时间。

2. 直线探索法布线器

直线探索法布线器从一对连接点的每个点出发，同时或顺序构建线段，一旦两条线路交叉，便完成了连接。这种方法具有95%的布通率。

3. 通道布线器

这种方法在布设电路元器件时，在元器件之间留有水平或垂直的通道，通过该通道可以形成连接路径。任何两个被连接的点必须位于同一通道内，同一列或同一排，以便布线器进行连接。布线器首先连接最短的路径，并且继续下去，直到该通道内所有的连接全部完成为止，然后移动到下一个通道进行连接，最后完成另外一个面的连接。这是因为布线器在两个层面的路线运算法则不同，一面是垂直连接，而在另一面则是水平连接。

4. 拆分算法布线器

这种方法的运算法则将板分成一个个网格，一个连接点占有一个网格单元。含有连接点的单元称为障碍，没有连接点的单元称为空白单元。该运算法则是利用可用的单元在两个连接点之间找到最短的走线路径，直到所有的点都完成连接（Ginsberg，1992c）。

5. 推挤布线器

在这种方法中，当已经完成的路径对后来的路径形成障碍时，该路径不能移动，但是可以重新布设，通过推或挤其中的一小部分形成一个增加的路径通道。这项技术经常被设计者采用，如图5-31所示。

自动布线算法的效能经常以完成整个布线的百分比来衡量，换句话说，用所需手工完成的总量来衡量。此外，花费的时间和系统资源也是非常重要的值

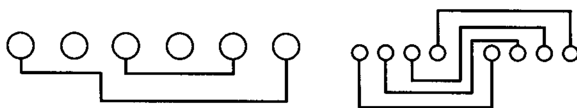


图 5-31　推挤布线器

得考虑的因素。图 5-32 为布线的完成率与布线时间和线路密度之间的关系。最好的布线方式是找到经济因素和技术因素之间的平衡点。当发现自身行为与接线程序相矛盾时，或是受到违反规则的信号时，系统允许使用者完成未完成的连接。重新登录的功能有助于设计者修改先前的设计，移动、删除和添加导线。

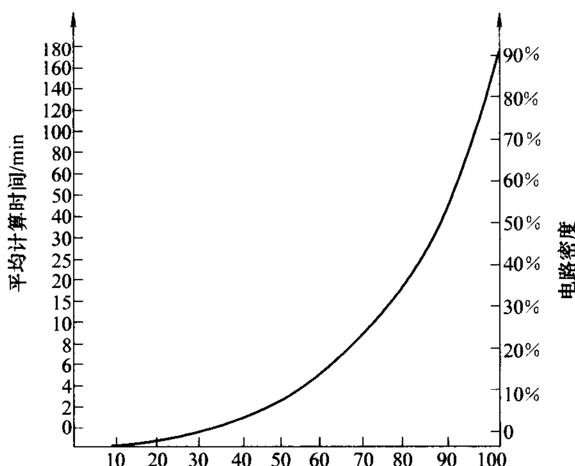


图 5-32　布线的完成率与布线时间和线路密度之间的关系
（经 Herrmann 同意重绘，1992）

任何布线器都不能在每个板上实现百分之百的自动布线，这就需要手工进行补充完成。一般而言，最后少数线路的布线也是最困难的连接，通常需要改变先前的布局。图 5-33 说明自动布线后，需要的手工工作量与未连接的数量成反比。然而，更快和功能更强的微型计算机正在使布线系统的使用成为可能，这样最终可能实现性能越来越高的自动布线。Mantay 等人（1991）描述了一种简单的关于最优化自动布线印制电路板设计模型的可制造性和布线性能。

在自动布线中，布线器布设的导线间隔是通过各种类型的间隔构建方法形成的。这些方法是网格、无网格、通道方法以及这些方法的联合使用。

1）网格布线。在这种方法中，只要不与焊盘、元器件引脚、过孔或保留区域产生冲突，导线就可以放置在任何网格线上。网格布线机最好用于主要包含小规模（SSI）和中规模（MSI）集成电路的布线。元器件的密度越高，布线的速度就越慢，这是因为必须处理大量的坐标矢量。

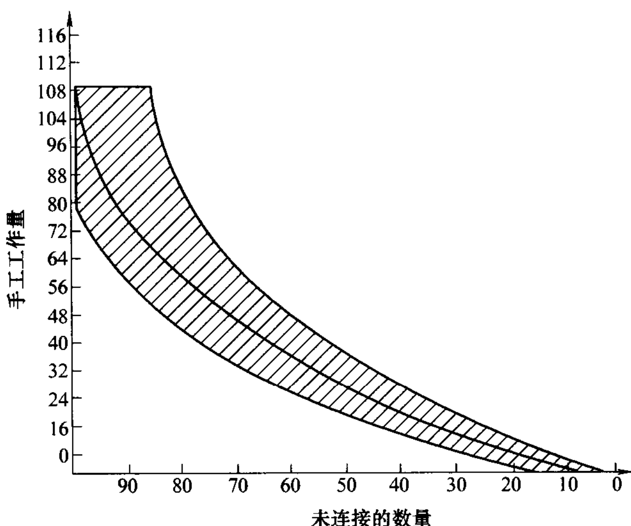


图 5-33 完成曲线：自动布线后手工工作量与未连接数量的关系
（经 Herrmann 同意重绘，1992）

2）无网格布线。无网格布线器也是根据设计规范进行布线，但是不拘泥于固定的网格和单元尺寸，而是估定当前布设的导线宽度、间距和过孔的尺寸，以便自由更改网格尺寸。这项技术允许大量导线穿越一定范围的表面，并允许导线间有不同宽度的间距，以便避开障碍物，如引脚和过孔。无网格布线器的优点是拓扑和封装工艺很容易改变，例如 SMD。然而这种方法非常慢。

3）可塑性的网格布线。可塑性的网格或灵活的区表面结构允许每个布线网格有不同的尺寸。在实际布线以前，通过可塑性的网格算法建立多种尺寸的长方形网格图样，以适应印制电路板上的元器件和其他限制。这样，密集元器件的放置和特殊的焊盘间距，例如不在网格点上，就很容易调节使之连接到所有的焊盘中心。这种方法比网格布线方法更慢。

4）通道布线器。通道表面结构形成了由一系列通道组成的线路表面，这些通道穿过线路表面设备的引脚。过孔被放置在通道之间，与元器件的引脚使用同一个图样，这样就可以为线路和过孔预留出空间了。

以上提到的技术也可以联合使用，使印制电路板的表面空间得到恰当利用。

5.8.5 校验

在布线完成以后，应运用检验程序检测设计是否完全符合指定的标准。这些检验参数可以是间距、镀通孔数量的最小值、特殊的设计规则、导线的载流能力、引脚开路或无连接、位置错误等。这些错误以闪烁的形式在显示器上显

示出来，可通过设计者与机器的交互进行纠正。

5.8.5.1　验证/设计规则检查

对手工设计而言，每一项都需要进行检查，以找出可能的错误来源。元器件尺寸、孔尺寸、导线的宽度和间距、焊盘-孔比率、无元器件的板的区域、边缘间距、位置精确度以及电气连接等都要亲自进行仔细的检查。自动设计也需要在设计期间通过软件进行以上几个类型的检查。

使用 CAD 工具完成印制电路板的设计之后，为了找出可能存在的错误，设计者必须再次校验印制电路板。这种验证/设计规则检查包括：

1）一般验证；

2）物理验证；

3）电气验证。

1. 一般验证

一般验证检验为板的检验，检验设计中最基本的要求，这种检验主要解决以下几个问题：

1）为了信号的顺利传输，线路已经分析并划分成基本的区域了吗?

2）基本的网格图样已经得到完全利用了吗?

3）板的尺寸与层的数量的选择是最低的制造成本吗?

4）任何导线都具有较好的宽度和间距吗?

5）是否选用了较好的焊盘和孔尺寸?

6）所用的跨接线是否为最少?

7）大面积镀铜区被分割，以防止起泡吗?

8）是否制作了安装孔?

9）在必要的地方留有制作样本区域了吗?

10）一些必需的地方被有效屏蔽了吗?

2. 物理验证

物理验证是指检验元器件的放置，以及查看其他各种妨碍。这种验证主要解决以下几个问题：

1）接线端和控制部位与整个装置是否谐调。例如，部件的工作是否与其他部件相关联。

2）安装的板子是否将会满足冲击或振动的要求。

3）是否使用了专业标准（例如，IPC2221、IPC2222）。

4）能够充分支持不稳定和较重的部件。

CAD 系统可以检查违规的放置，包括元器件与元器件之间的间距以及其他放置错误，例如插入元器件的轮廓或网格限制。

3. 电气验证

信号路径通常按照优先权进行布设，首先布设的是优先级别最高的信号，例如低电平信号，其次是那些在版面设计中能够进行较大移动的信号。地信号通常放置在电路板的外缘，因为它要便于内部地线与总地线的连接。地信号和电源信号要最先布设，以确保一个好的、清晰的接地路径。地信号线必须足够宽，以保证其载流能力足够大并且大于板子的额定电流。大多数情况下，地信号和电源信号放置在板子元器件面的集成电路的各排引脚之间。这样，可以将所有交叉导线放置在板子的线路面，以便在装配后清晰可见，这有助于售后工程师在检测障碍时容易找到信号路径。

对于以下几个方面进行电气检验非常重要：

1）已经分析了导线电阻、电容和电感的影响吗？这对于严重的电压降和地尤其重要。

2）导线和部件的间距与形状符合绝缘要求吗？

3）对于频率在100MHz以上的数字信号和300MHz以上的模拟信号提供受控阻抗吗？

4）充分确定极性了吗？

5）表面涂层的绝缘性评估了吗？

电气验证工具可用于检测电气违规，验证线路的间距与电子数据表中所列的标准是否一致。线路间距违规引发的任何问题都是这样鉴别的。

5.8.5.2 违反设计规则的检查

CAD工具用于扫描电原理图并检查基本设计与电气规范的一致性。这些检查对于连续性验证检测和间隙违规检测来说是最简单的。由于高技术含量的设备具有严格的公差，因此间隙检查是非常重要的。检查包含以下几个项目：

1）导线-导线的间距；

2）导线-焊盘的间距；

3）焊盘-焊盘的间距；

4）过孔-过孔的间距；

5）机械间隙（板子的边缘、板子连接器的周围、安装孔的周围）。

基本设计规则检查包括焊盘-焊盘、焊盘-导线、导线-导线、焊盘-过孔的间隙检查，如图5-34所示。

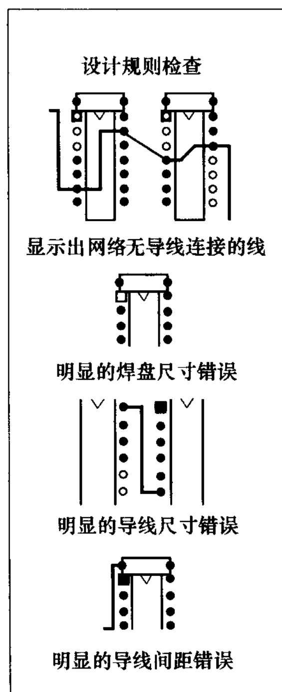


图5-34 违反设计规则实例（IPC-D-390）

5.8.5.3 为避免错误的通用导则

为了避免设计错误，必须考虑以下几个因素：

1）设计必须具有完全的、限定的版面轮廓。没有或者只有部分版面轮廓是无效的，即不可接受的。在设计中只能有一个板面轮廓。

2）在布线期间，当放置元器件时，必须在连接的焊盘和轮廓之间留有足够的间距，以避免放置元器件时违规，边缘指连接器经常发生这样的违规。

3）位于板轮廓外面的连接元器件的焊盘将被丢弃。

4）布线完成以前不要试图去用铜、轮廓或元器件分割印制电路板的层面。

5.8.5.4　标识检查

为了得到正确的文件和标识，应对布线图进行以下几项检查：

1）印制电路板的序号；

2）组装件的名称和序号；

3）修订信息和序号；

4）序列号。

大多数 CAD 系统能够完成多种设计的检查，包括接线和尺寸检查。CAD 系统通常所提供的网络表驱动程序用以检查与布局相对应的线路的连续性以及与线路连续性相对应的布局。

当前，CAD 软件的开发者和用户面临的主要问题是板的尺寸和密度。对于大部分系统，封装设计工程师能够通过蒙蔽系统、改变网格和分割电路板找到解决这些问题的方法。此外，更高技术水平的设计，包括典型高速 RF 设计的极高密度的模拟线路、精细线路技术、表面贴装技术、柔性印制电路、厚膜设计，是 CAD 软件开发者和封装设计师面临的具大挑战，他们必须使用现有的 CAD 系统工作。

5.9　自动设计

一个自动设计系统要求计算机能够像设计者一样工作，而不仅仅是充当设计者的助理。由于设计中要处理大量的数据，因此需要使用一个高性能的计算机。

使用 CAD 系统进行设计时，一般大约只有 80% ~90% 的导线布设可自动完成。自动设计能够完成将近 100% 的导线布设，这主要是通过反复运行布线程序，不断更新原先的路径和过孔完成的。在反复布线中，新的布线只能在以前的步骤完全结束后才能开始，因而需要大量的程序运行时间。因此，只有高处理性能的计算机才能用于自动设计。

在许多数字集成电路的封装中，同一个封装包含 2 ~8 个类似的门。此软件不仅能优化板上的封装位置，而且还能够把一个封装中的门移到另一个封装中，以使总的互连线路长度和过孔数达到最少。自动校验可保证门的扇出能力被考

虑在内。

自动设计软件也提供了导线布设和元器件放置功能，可在电路板的所有传导层同时进行设计。这消除了第一层图形密集，而最后一层图形稀疏的可能性，这一点对于多基板的设计非常重要。

尤其对于那些具有大量集成电路的高度复杂度的双面板和多基板而言，自动设计是一种极其有效的工具。与 CAD 相比，自动设计中整个系统的机动性受到了限制，因为它不能利用比计算机运算方法更高级的人的智慧。自动设计广泛应用于机动性要求不高以及遵循一定标准的设计中，例如数字系统的设计。在设计的各个步骤之间，使用标准的板子的机械轮廓和元器件/封装的类型。在标准化设计中，自动设计通常在没有人类参与的情况下就能够完成任务，但是偶尔也需设计者的参与，尤其对于一些较复杂的设计而言。

自动设计也可能需要进行设计修正，与 CAD 系统相比，由于涉及到整个设计过程，所以需要更多的时间和更高的成本。在 CAD 中，修正更多地是由手工通过简单的方法在显示器上完成的。

CAD 系统的优点在于提供了产品档案，并可以在自动设计中进一步改进。这些档案甚至包括工程设计报告、空闲门的数量、未使用的引脚和热量的分布情况。

电子设计自动化（EDA）系统开发者面临的最艰巨的问题就是减小板的尺寸并增加封装密度。同样，更高的设计技术需求，包括极高密度模拟电路典型的高速高频设计、精细线技术、表面贴装技术和柔性印制电路，都是系统开发者和印制电路板设计者要面临的重要问题。设计者的聪明才智就表现在找到工作的途径，通过改变网格或拆分电路板的方法找到解决方案等。

现在有许多公司出售 PCB-EDA 软件系统，它们具有相似的风格，但又具有这样或那样微小的差别。

5.9.1 CAD 系统的选择

许多 CAD 系统都非常有用，然而选择适合需要的工具却非常难。早期在个人计算机上运行的简单程序现已变得非常复杂，例如 SMARTWORK、PROTEL、P-CAD 和 CAD-STAR。最新的一些 CAD 系统是非常优秀的，包括：

1）Mentor Expedition 2000；

2）Cadence Allegro V13.6；

3）Innoveda Power PCB V3.6；

4）甚至更便宜的系统，例如 EDW 2000。

一般的 CAD 系统包括电原理图的获取、仿真、库、放置、自动布线、后续处理和文件。并对每一项进行评估。

1）样品板：避免使用样品板。它太简单，看起来总是很好，但并不能代表实际情况。使用已经设计好的电路板作为参考（使用现有的最好的板子）。

2）样品许可：这是评估目标规范文件的最好方法，但是要花费很多的时间仔细研究该软件，了解它是怎样和使用环境相结合的。

3）EMI、热量、几何形状以及其他技术要求：专门关于 RF、EMI、热量、几何形状以及其他技术要求的问题，能使系统做得更好。

4）自动布线器：可通过完成布线的百分比和所花费的时间来判断哪一种布线工具最好，能提高相应的布线质量。

5）公制系统：该软件是否百分之百地兼容公制？设计者和元器件厂商需要抛弃英制测量系统，使用公制系统。

6）库：软件供应商提供的元器件库大多数包含陈旧和过时的元器件，并且没有支持文件吗？

库中包含什么样的信息？一个好的库应该满足所有制作需求。例如：元器件系列；元器件的集合形状；文件；公差；丝网印制轮廓；链接或搜索引擎；常规命名；新建元器件；极性标记；安装和加工孔；公制单位的转换；焊盘图样。

7）标准接口：有时会需要标准接口，如“GENCAM”。检查 CAD 软件是否与 GENCAM 的输入和输出兼容。

5.10　印制电路板设计中手工设计和自动设计的比较

采用自动的方法进行印制电路板设计和生成布线图，以及到一个什么样的程度，取决于很多因素。每一种方法都有它最合适的使用范围以供选择。

1. 手工设计和生成布线图

对于简单的单面板和双面板，用手工进行设计是首选的方法，它也可以成功地运用于复杂性比较高的电路的单一产品或小批量产品的生产。手工设计具有很高的机动性和人类所有可能的独创性。然而，对于高复杂度的数字电路板，特别是包含 100 个以上集成电路的板子，很难通过手工设计实现。手工方法在质量、时间以及所需的培训人员方面也都受到了限制。

在世界范围内，很大比例的印制电路板的设计和布线图的生成仍然通过手工完成。完全的手工方法不需要任何投资，所以更多地被采用，尽管它可以实现的部分已变得越来越少，特别是在数字印制电路板的设计中。

2. 自动设计

全自动印制电路板的设计和布线图的生成是非常有价值的，它要求标准化输入，具有少量的简单的实施规范。对于设计包含 150 个以上集成电路的高精

度复杂的数字电路板以及难度极大的多基板而言，它是一个理想的工具。总的设计时间可以从几周减少到几天，并且可以得到一个几乎完美的结果。对于大量印制电路板的设计而言，需要有一个严格的时间表，这是很重要的，同时要求调试和矫正达到最少，这就使 CAD 时常成为首选的方法。布线图的自动绘制也比手工绘制或胶带粘贴方法具有更高的精确度。

模拟印制电路板通常不使用自动设计，因为它不同于数字电路，大多数模拟印制电路板很难简化各种设计条件，很难生成一个直观而简单的实施规范表。

CAD 设备的大量投资总是要求系统得到充分的利用。如果电路板中的集成电路数少于 20 个、离散元器件的数量超过 50%，或者只需要很少量的印制电路板，则使用 CAD 几乎是没有效果的。

5.11 光学绘图仪

经 CAD 系统处理的数字信息可以由一个叫做“光学绘图仪”的设备通过类似照相的方法转换为图形。光学绘图仪的绘图头是一个光点投影机，它根据照片胶片上图形的相对位置而变化。绘图头或绘图工作台或二者都进行移动，这要取决于光学绘图仪的设计。

光学绘图仪，正如其命名的那样，是通过光进行绘图，并且必须对所用的工具编程，绘出导线的轨迹。光学绘图仪的工具是指光通过一个特别选定的孔径在给定的胶片上形成一个特定的形状。孔径可以固定不动地制作一个形状，也可以通过移动制作一条线或一段弧。

光学绘图仪有两种主要的类型，矢量型和光栅型（或激光型）。每一种类型可以处理不同的孔径。矢量型光学绘图仪逐渐被淘汰，并被激光型光学绘图仪所取代。激光绘图仪比矢量绘图仪操作更快，例如，绘制一个复杂的图形，用矢量绘图仪需要几个小时，而激光绘图仪通常只需要 10min，甚至更少的时间即可完成，减少了绘制时间的同时也极大地降低了绘图成本。光学绘图仪有三个主要特性：

1）光学绘图头，包括一整套形状；

2）胶片绘图器；

3）软件。

与笔式绘图仪相比，光学绘图仪的主要优点是线非常清晰、一致而且精确，不会遗漏和变淡。光学绘图头有 24 种形状之多，有几种线宽和焊盘形状可供用户选用。有两种类型的光学绘图仪的资料可供使用（Ward，1992）。

5.11.1 矢量绘图仪

计算机数字控制（CNC）矢量绘图仪通过在照相胶片上移动投影头（projection head）进行光学绘图。当投影头固定不动时，能够通过光源闪动描绘焊盘或任何固定的形状。投影头移动时，能够离开光源来描绘线路。

矢量绘图仪的投影头是机械性控制的，可通过使用不同的孔径控制投影光的尺寸和形状。这些孔径可以是固定的，也可以是变化的。

1）孔径轮：习惯上，矢量绘图仪有一个配套的带有孔径轮的笔式描绘仪的笔架。孔径轮是一个圆盘，在其周围放射状地分布着 24 ~ 70 个孔径。当绘图仪选择某个孔径时，孔径轮旋转至需要的孔径位置，并刚好处于光源和胶片之间。孔径本身具有一套胶片，能够制成任何形状。实践证明，这个过程需要消耗大量的时间，并且物理尺寸也受到了限制。

2）闪光和绘制孔径：为了实现矢量绘图仪的连续曝光，用于焊盘闪光和绘制导线的孔径需要不同的滤光。因此闪光和绘制孔径不能进行互换，否则会有局部过度曝光或曝光不充分的危险。

因为孔径轮上的每个孔必须手工进行安装和排列，所以孔径轮的设立是非常精确和耗时的过程。为了避免重复安装并节约成本，设计者要求绘图仪的供应商在文件中保持一个轮，并一直用同一套孔径。这样做也有其明显的缺点，限制了设计的灵活性和向其他供应商的转移。

5.11.2 激光绘图仪

激光绘图技术中，在机器绘图以前，全部读入要执行的指令，并由光栅图像处理器（RIP）释义。RIP 通常将这些命令划分为中间形式，然后进行实时处理，产生一连串激光调制器的开关命令。

激光绘图仪根据矢量绘图仪文件产生一系列小点的集合来形成线路和焊盘。通常点（像素）越小，图形效果越好。但是点越小，描绘这些点所需要的时间也越长。

SMD 需要大量焊盘的形状和定位尺寸。CAD 系统具有两种解决方法。当需要多种焊盘形状时，一种方法是定义每个形状的符号。另一种更简单、更经济的方法是定义每个形状定义一个孔。

总之，有两种因素导致矢量绘图仪的淘汰：一方面是设计密度的增加；另一方面是分步处理多个图像增加了绘图命令，需要绘图仪有极高的描绘速度。因此，激光绘图仪的成功使用就不足为奇了。进行一束激光扫描要比移动 CNC 机器容易得多。

现在，仍继续用“孔径”描述焊盘和导线的形状，而用“孔径表”取代了

孔径轮。在激光绘图仪中使用孔径表具有以下显著的优点：

1）通过软件可以很容易地生成孔的形状，不需要设计物理轮。

2）如果系统支持扩展的 Gerber 形式，可用 Gerber 文件描述孔的形状，这样可以减少列表错误的可能。

3）通过孔径表可定义更多的孔。

4）允许生成特有的比孔径轮产生的物理尺寸大的孔径（不常如此）。

5.11.3 光学绘图仪

绘图仪数据标准实际上是 Gerber 形式，更恰当的说是 RS-274D。Gerber 是指 Gerber 科技有限公司，它是绘图仪制作的先锋和领导者。最流行的形式为扩展的 Gerber（“RS-274X”和 MDA FIRE 自动绘图，两者都可将孔径表信息写入文件中）。RS-274D 是在传统数字控制（NC）机床代码基础上的变更，鉴于它使用工具所选择的运行编码，它与传统的 NC 形式（例如，钻孔数据）不同，而具有更高的兼容性。

1. D 编码

D 编码具有多种功能。它能控制光源的开启和关闭状态，光源状态的有效编码为 D01，D02，D03。

1）D01：下一步移动时光源开启；

2）D02：下一步移动时光源关闭；

3）D03：移动之后光源闪烁（光源开启，光源关闭）。

D 编码值大于或等于 10 时表示孔的位置在孔径表或孔径轮上。D10 和更高的值中含有由单独的用户为其指定的孔径形状和尺寸。例如，在一个项目中，D10 可能是一个 10mil 的圆，而在另一个项目中，D10 可能是一个 40mil 的正方形。

2. X 和 Y 编码

在 Gerber 文件中，X 和 Y 值决定了即将放置和绘制的孔的形状和尺寸。X 和 Y 值成对使用，共同确定绘制线和弧以及光源在实体间移动时光点的位置、使用的 D 编码的形式（例如，D10）和光源的状态（例如，D01，D02，D03）。

3. G 编码

G 编码用于设定光学绘图仪。常用的执行编码包括：

1）G01：下一个 X，Y 命令为直线移动；

2）G02：下一个 X，Y 命令为顺时针方向的曲线；

3）G03：下一个 X，Y 命令为逆时针方向的曲线；

4）G04：忽略块的其余部分（用于注释）；

5）G54：准备改变孔径（在激光绘图仪中不是必需的）；

6）G74：下一个曲线为 1/4 弧线；

7）G75：下一个曲线是 360°的弧，允许使用单一的命令绘制一个完整的圆；

8）G90：绝对数据，控制器移动至 X 和 Y 值的绝对值位置；

9）G91：增加的数据，仪器按照 X 和 Y 值的数值总和移动，不管是否到绝对的坐标点。

4. M 编码

M 编码用于仪器的控制。常用的编码包括：

1）M00：仪器完全停止，常常被许多绘图仪忽略；

2）M01：仪器临时停止，常常被许多描绘器忽略；

3）M02：绘图终止。

为了使 CAD 设计可直接用于 CAM 系统，绘制的图形必须为 Gerber，HPGL，DXF 或硬复制的形式。该图形在制造过程中作为参考，因此图形中应该提供板子轮廓的尺寸，以及任何内部线路的尺寸和位置，也应该包含孔的图表及钻孔位置。任何非镀通孔（NPTH）都应被清楚地标明，这是非常重要的。

5.12 计算机辅助制造

计算机辅助制造（CAM）提取设计系统的输出，并将其应用于制造过程。硬件和操作系统在很大程度上与 CAD 系统非常相似。只不过，CAD 系统是关于放置和布线的程序，而 CAM 程序用于制造过程。CAD/CAM 系统可综合在一起，共用同一个数据库，如图 5-35 所示。

当公共数据库转换为 CAM 设备要求的数据形式时，可全部用于提供操作 NC 印制电路板制作机械所有必需的数据。计算机可根据实际的力学性能优化这些数据，如钻孔速度、布线能力、工具速度选择等。此外，从 CAD/CAM 数据库得到的数据也可用于元器件集成设备的顺序控制，从而使自动化程度达到最高，CAD/CAM 系统也能为测试设备提供必要的输入。随着应用软件的出现，能够为裸板和在线路中测试等提供正确的测试数据形式，这大大激发了印制电路制作商对于计算辅助测试技术的兴趣。

一个印制电路板从形成设计思想至最终交付成品的过程中所遵循的典型的工作和操作顺序如图 5-36 所示，该图说明了计算机辅助设计、制造和测试功能在操作流程中如何完成彼此之间的信息交互。

基于公共数据库和网络集成在一起的计算机辅助工程、设计和制造（CAE/CAD/CAM）现在已变得非常流行，它可以使用户将前端的 CAE 和末端的 CAM 连接在一起，如图 5-37 所示。例如，利用 CAE 的仿真功能建立的测试图样能够进行产品测试，尤其是在密距表面安装增加的情况下能够使电子产品厂商能够

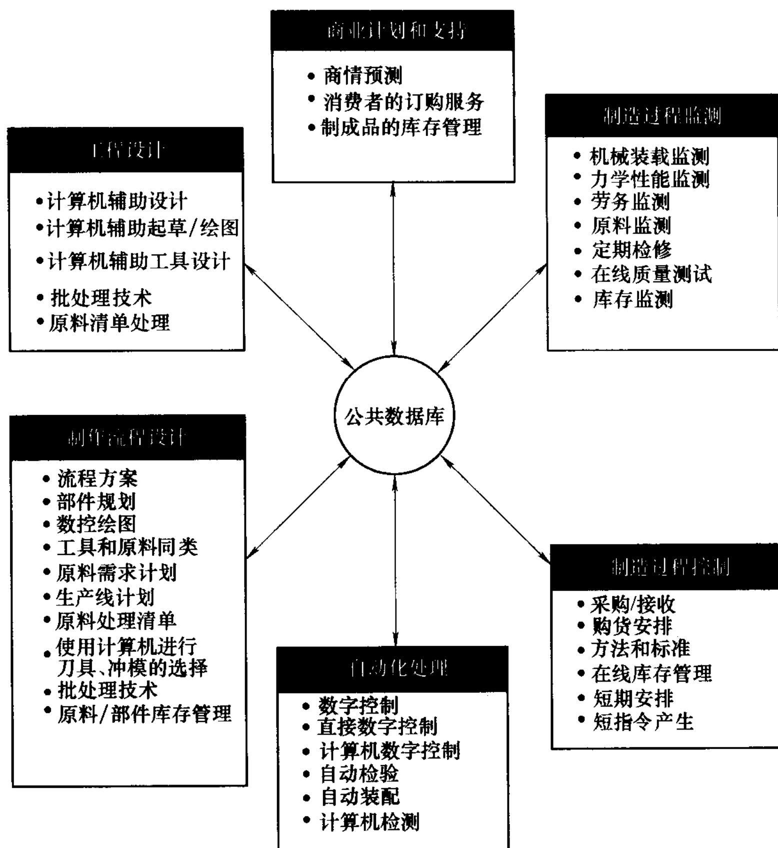


图 5-35 CAD/CAM 的公共数据库：使用公共数据库的 CAD 系统可以满足 CAM 的需求（经 Ginsberg 同意改编，1992c）

进行在线路测试至功能测试。

使用 CAD/CAM 系统有助于优化印制电路板的制造能力，还可以提高产品的电气性能。此外 CAD/CAM 软件可使所用的过孔达到最少，从而改善印制电路板的性能，例如：

1）将尖锐的 90°的导线弯曲改变成 45°角或曲线；

2）增加导线和过孔间的间距；

3）增加导线间距；

4）增加焊盘和孔的尺寸；

5）使连接区之间的导线布设在中间位置；

6）通常可增加导线的性能尺寸（例如，更多的铜）。

在 CAD 系统中，设计者选择的基本路线决定了板的复杂程度。选择的规范

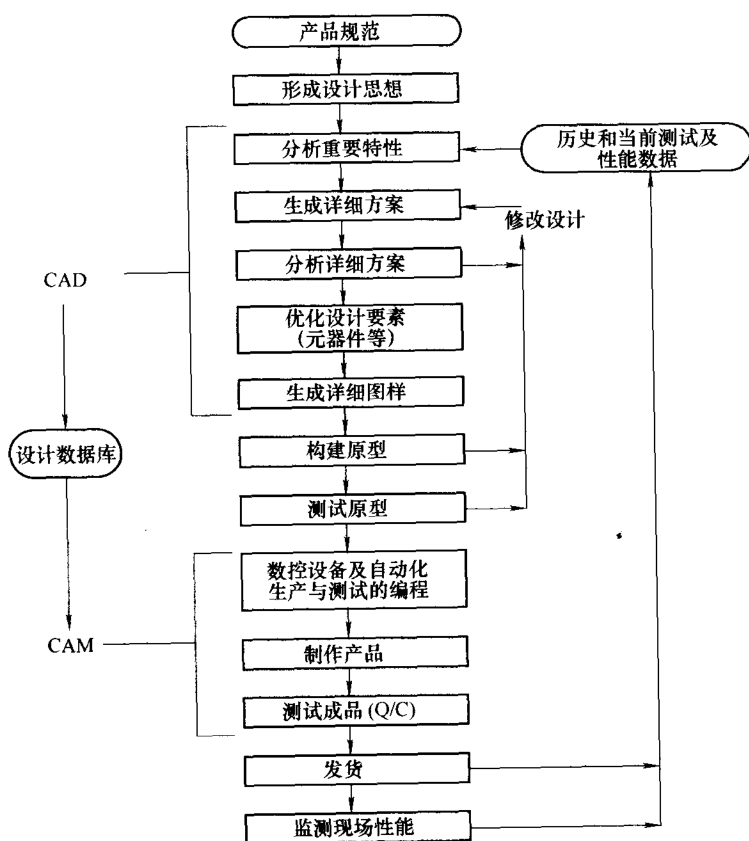


图 5-36　印制电路板从形成设计思想至最终交付过程中所需的 CAD/CAM 系统的典型的工作和操作顺序（经 Ginsberg 同意改编，1992b）

包括层的数量、最小走线和过孔尺寸，以及对象间的最小间距。在放置阶段，设计者选择元器件在板上的位置，当放置程序完成以后，可生成物理网络表。该网络表由引脚组组成，每一组引脚都有指定的参考标志符、要安装的板面和 x、y 坐标。每一组引脚代表一个物理网络。此外，元器件的放置位置决定了引脚图的位置，引脚图包含所有层中所有需要将元器件和其他部分相连的焊盘。大多数引脚图中包含支持层和图形的辅助性能的信息，典型的例子是放置过程中的丝网印制和阻焊层。这些层不受设计者欢迎，因此很少使用，设计者主要感兴趣的是覆铜层。

布线过程需要几个小时或几天才能完成，目的是在板上通过物理部件得到物理网络表。这些部件包含三种类型的实体：走线，能够从同一层各个位置运载电流的一系列导线；过孔，包括所有层或部分层的焊盘以及实现其物理连接的孔，可以认为是层间传输信息的垂直连线；平面，在多个引脚间连通电源或

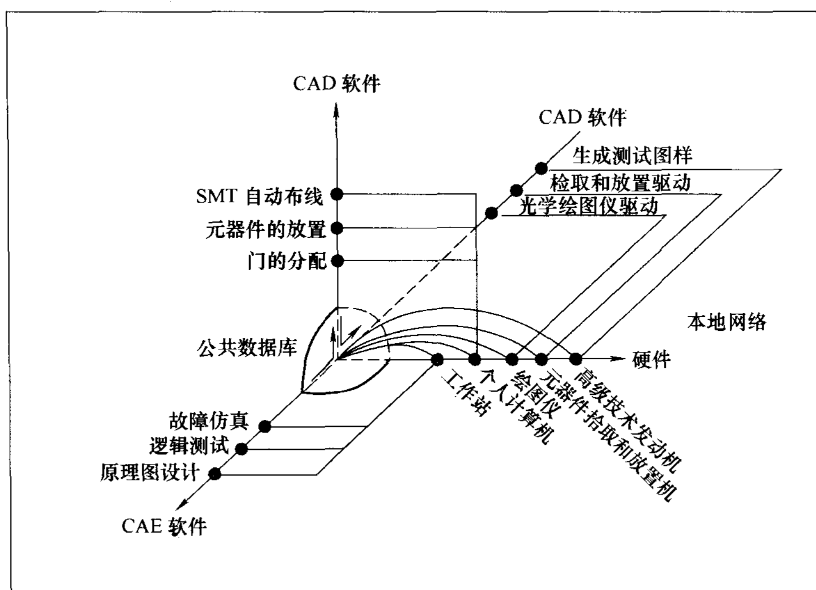


图 5-37 基于公共数据库和网络集成在一起的 CAE/CAD/CAM 及可连接前端的 CAE 和末端的 CAM（经 Ginsberg 同意重绘，1992a）

地信号的实心或有开口的铜区域。

设计程序的最后阶段是生成产品。在以前的阶段，设计者的工作大多数是关于逻辑部分，按需要放置元器件，并将所有类型的焊盘自动连接至各层。自动布线意味着遵循一系列的技术准则，即使用一定的线宽和过孔尺寸。生成产品阶段，设计者必须建立各种形式的文件，包括：

1）Gerber 文件，描述绘图层；
2）钻孔文件，典型的为 Excellon 形式，描述引脚孔、过孔和机械孔；
3）HPGL/DXF 文件，描述机械图形；
4）网络表文件（IPC-356D 或各种 CAD 形式），描述物理连通性；
5）原料清单，包括元器件和封装清单。

为了提高 CAD 和 CAM 系统的效率，希望输出的数据标准化，印制电路板制造者更多地使用 CAD 数据，以帮助产品生成准备好的照相工具。为了这个目的，图形通常被划分为以下几个部分：

1）元器件面的照相原图；
2）焊接面的照相原图（镜像图像）；
3）元器件面接地平面的负片；
4）线路面接地平面的负片（镜像图像）；
5）板的装配图形，包括板的轮廓、元器件轮廓和参考标志符；

6）板的装配参考标志符表（每表可不选图形或只选择一个图形）；

7）光点图形；

8）钻孔编辑。

通常查看的图样为元器件面。然而，为了避免误解，通常建议把“元器件查看面”清晰地印制在每一个图形上。

随着导线变得越来越细、间距越来越小，前端自动操作似乎成为了真正解决印制电路板制造问题的惟一方法。图 5-38 为利用前端系统进行印制电路板精确加工的方案。厂商使用的前端自动操作的输入数据来自于 CAD 系统的数据输出，最常用的数据结构为 Gerber 形式。当 Gerber 图形文件不可用时，许多公司使用布线图库。这样，每一个布线图层都能被扫描和转换为 Gerber 图形文件，这个文件能够被前端系统调用。

每一个层的数据被加载到工作站，并电子标注 x、y 坐标和角度。一旦载入，操作员就有机会执行自动设计规范检验来验证走线之间、焊盘之间、走线和焊盘之间以及孔与铜边缘之间的间距。工作站的操作员能够控制系统，分步、重复、旋转和/或镜像设计方案，通过合适的版面设计使原材料得到最佳的利用。然后，操作员可以添加符合相关标准或消费者要求的试样、参考数量、除去树脂的图样、测试图样、镀边和加工孔。操作者也可以在丝网印制过程中补充零散的项目。

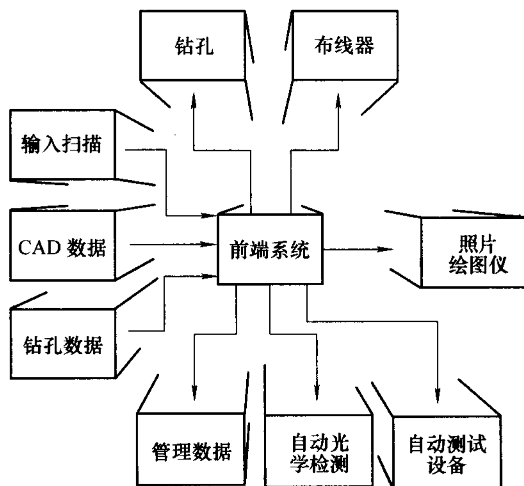


图 5-38　使用前端自动操作系统的方案实现印制电路板的精确加工

数据输出至激光绘图仪，这是产生的第一个卤化银原图，能够直接用于生产。这些原图比接触制图更加精确，并减少了需要视觉检查的数量。实际上，加工引脚可插入到激光绘图仪的薄膜压盘或平板中，使面板图像直接输出至预打孔的底片上。CNC 产生的钻孔数据具有百分百的精确性。布线数据也能够被输出，以备以后处理时使用。类似的，数据能够被输出至裸板测试设备和自动光学检测仪。这个程序可以使厂商建立相对于数据库性能尺寸的检验公差，在短时间内生成整个加工范围。输出的高精确度和高质量可以使印制电路板厂商生产的电路板具有更高收益。Williamson（1990）解释了裸板制造过程中前端自

动操作系统的概念。

Murray（1996）在讨论 CAD 到 CAM 的数据传输问题时，提出了可制造性设计（DFM）的重要性，并阐明 DFM 即将打破印制电路板设计者和制作者之间的障碍。为了有效地利用成本，即使当制造时间被压缩时，产品的制造也能够并且应该从设计中得到正常的输出。

5.13 数据传输机制

设计系统的数据传输一直是印制电路板制造业一项难题（Dolberg 和 Kovarsky，1997），虽然花费了很多年的时间把物理胶片转换成数字数据，但是驱动光学绘图仪和钻孔机的数据依然基于陈旧的形式。如果试图迎合消费者的时间就是市场的目标，那么使用标准化的操作方法进行 CAE、CAD 和 CAM 之间的数据传输是绝对必要的。

1995 IPC（电子电路互连与封装协会）技术指南定义了几种 CAD 到 CAM 的数据传输方法，这推动了 IPC-2510 系列通用计算机辅助制造（GenCAM）标准的改进，并在 1998 年 11 月首次颁布。GenCAM 的通用要求在 IPC-2511 中进行了说明。整个系列可在 GenCAM 网站中查询，并能够自由下载。

GenCAM 是由专业人士研发的用于描述印制电路板制造和测试的一种 ASCII 形式；包括原料清单、组装、检测和在电路测试文件，以及管理和结构控制处理问题。它是一个单独的文件，能够完整的描述印制电路板，印制电路板装配、装配排列、子板上的多种装配、一个板子的制造面板、质量评估附单和装配/测试的固定装置。GenCAM 为所有 CAD/CAM 工具开发者建立了一个标准的软件研发原则，并能够完全被 ANSI 标准支持。

IPC-2511 是一个通用标准，用基本的文本描绘了 GenCAM 数据模型的所有要求。此外，它具有一个计算机编码，能够帮助设计者读取和理解某种事件的定义方式。计算机编码由两个德国科学家 Backus 和 Nauer 开发。Backus 和 Nauer 形式（DNF）在测试 GenCAM 形式的应用和计算机程序描述方面已经使用了很多年。

为了与商业合作伙伴交流信息，数据转换在产品描述、设备信息或供应链联络方面将向网络化发展。在商业领域，人们正在进行不断的改变，电子商务、环球网和其他许多因素迫使企业重新考虑信息从一个信息源到另一个信息源的传输方法。毫无疑问，利用环球网传送机制不仅仅是巨大的需要，更是将来贸易必然的趋势。

现在已经开发的通过环球网传输数据的形式为 XML。BNF 和 XML 形式非常的相似，一些个人/公司已经有将 BNF 文件转换为 XML 文件的工具，并且不会

丢失任何信息。

现在，已经开发了许多有助于XML文件执行的工具。人们期望随着业界超前于XML的发展，将会开发出许多工具，从而进一步提高数据转换文件中各个组成部分的性能和描述。

大多数电子公司已经连接了英特网，能够拨号上网（用调制解调器连接到服务站点的一个主机）或直接数字连接，连接速度为14.4kbit/s～1.544Mbit/s或者更高，价格因公司购买的带宽不同而不同。Creighton（1996）指出，他们发现英特网是一个非常可靠的、经济的将印制电路板设计转至买主的方式。然而，他建议，即使选择英特网进行工作，也要有一个调制解调器作为后备，众所周知，英特网偶尔也会出现传输失败。

在许多公司，网络文件传输已经成为印制电路板产品周期的一个标准部分。但是，随着科技和英特网的发展，文件传输方法将不断改进。英特网支持这种形式和文件传输，许多卖主和消费者可以将印制电路板文件集成上传和下载至自己的网络主页中。随着更多的用户可以使用高速数字连接，在线检验和图形演示已成为可能。

5.14 印制电路板设计检测清单

以下的检测将有助于确保设计过程的完整性：

1. 初始板的特征

1）放置板的轮廓；

2）编辑板的名称、装配序号及与下一个板相关的部件序号。

2. 输入网络表

检查单个引脚网、重复的网络名称、数字和字母组成引脚和网络表形式。

3. 外部的放置

包括放置、元器件高度、元器件孔、布线、铜箔和平面区域、过孔和跨接线、测试点、层限制。

4. 放置和安装固定的部件

1）放置安装孔、工具孔、连接器、电位计、开关以及被固定的其他部分；

2）放置安装孔之后，将距离板子左下脚最近的安装孔或是工具孔设置为起始点；

3）设置起始点以后，板子该点的坐标设定为（0，0）。

5. 板基准

在板子的每一个包含部件的面的三个角放置板基准。这个基准应该距离板的每个角5mm，如果有可能，应保证其他部件距离该基准至少2mm。

6. 放置元器件

1）放置主要的集成电路，建立版面设计流程；

2）放置所有重要的元器件，这些元器件需要考虑其 EMI、高速、电阻控制、热量和高电压；

3）放置其余不重要的集成电路；

4）放置要求有局部基准的密距元器件；

5）放置剩余部件，要注意，保证元器件不要在板边缘 2mm 之内；

6）验证设计间隙，检查重叠部分。

7. 放置所有参考标志符

1）文本高度应尽可能和给定的板的密度一样大——不能大于 4mm/3.5mm，不能小于 1.5mm/0.5mm；

2）将所有参考标志符放置于部件外 0.3mm 间隔处；

3）所有参考标志符的方向为 0°或旋转 90°；

4）检查电路板空白区域标注的组件/部件序号，以及公司名称和板子的名称；

5）极性元器件在组装前和组装后都必须能看见下列一个或几个标注：极性标记、引脚 1 的文本或点标记及关键性的图案。

8. 检查部件列表和网络表

将印制电路板网络表与电原理图网络表相比，纠正任何不同之处，然后才能继续下一步的操作。

9. 建立设计规则

回顾默认的设计规则，建立总线组设计规则、电源网设计规则、其余网络和分类的设计规则。

10. 定义过孔

1）定义在设计中用到的所有过孔和测试焊盘；

2）一般的共用过孔可以放置于电源网中；

3）单独的过孔最好放置于接地面上。

11. 扇出信号

1）在板的剩余部分布线或自动布线之前，手工扇出剩余的信号；

2）布设时钟、匹配线长度和差分对；

3）扇出和路由总线；

4）板的剩余部分布线。

12. 添加测试点

建立测试审核规则和参数。

13. 履行设计规则检验

检查间隙、连通性、高速度、平面、测试点和结构。

14. 处理 Gerber、钻孔和组装数据

1）用数字方法挑选出钻孔表；

2）将钻孔尺寸从最小到最大排列，同时将其符号和尺寸统一起来，直到所有的孔尺寸都被定义。

15. 生成 Gerber 数据

1）选择除顶层和底层组装图的 Gerber 文件；

2）将 ASCII 网络表和设计网络表进行比较。

16. 生成装配图和钻孔图

1）选择笔、装配顶部、底部和钻孔图及压力；

2）生成制作和装配需要的压缩文件；

3）将所有数据安全存档，向制作和装配间发送适当的文件。

5.15　几个常用标准

1）IPC-2531：标准菜单文件格式（SRFF）规范。概述了 SRFF 文件必须达到的要求，描述了文件形式，概述了文件的分部，指出应当怎样表示目标数据，它可能是与厂商无关的，也可能是特殊的。

2）IPC-2547：车间现场印制电路板检测设备信息沟通（CAMX）分要求。描述状态信息内容和 XML 编码方案，能够对电子检验、测试和修正/再生产，即产品和加工质量等信息给出详细的定义。

3）IPC-2571：电子制造供应链的一般要求。定义 XML 编码方案，促进供应链的交互作用；这个方案定义了原料清单，认可厂商的列表，设计、制造和产品的改变。

4）IPC-2511-A：实施产品制造数据描述及传输方法的一般要求。定义实施产品制造数据描述和传输方法的一般要求，帮助使用者从 CAD 系统到 CAM 系统传输印制电路板制作、组装和测试所需的设计和制造要求。

5）IPC-2511-B：实施产品制造数据描述及 XML 方案传输方法的一般要求。详细说明代表数据文件形式的 XML 方案，描述印制电路板的工具、制造、装配检验和测试的要求。

第6章 覆 铜 板

6.1 基板的构造

基板的基本功能是为电子元器件提供机械支撑和电气连接。印制电路板所用的基板是复合材料。它们可以被简单地理解为是在一定的温度和压力条件下通过加压浸渍树脂的填充材料层而得到的。所获得的薄绝缘材料是填充物（加强层）和树脂的混合体，叫基材，所有的导体和元器件都可以安装在上面。这些材料可以是刚性的也可以是柔性的。

6.1.1 填充物（增强材料）

填充物意味着为基板提供机械强度、稳定性和刚性。常用的填充物是各种各样的纸、棉织物、石棉片以及不同形态的玻璃（例如布、连续玻璃纤维薄毡、陶瓷材料、钼）等。然而，最常用的材料是纸和玻璃纤维。

在绝大多数的印制电路板中使用纸作为增强材料。它们价格低廉且易于机械加工。当然，它们也可能吸收大量的潮气。

玻璃纤维作为加强材料则是因为它的高抗拉强度和尺寸稳定性。它对温度变化有很高的耐受力，并且其吸湿性很低。

6.1.2 树脂

树脂被用来浸渍所选定的填充物。在基材生产中普遍使用的树脂是酚醛树脂、聚酯、氰酸酯、环氧树脂和聚酰亚胺。其中，大约90%的基板使用的是环氧树脂和酚醛树脂。它们大部分是合成材料，不管是热塑性的还是热固性的，都通过聚合作用而形成。树脂的选择取决于其电气的、力学的、化学的和热学性能。所有这些性能依据印制电路板的特定应用而有不同的重要程度。

最常使用的环氧树脂，有时被添加物改良以达到更高的热学性能或改良其化学耐受力。对复合材料来说，基板的性能取决于使用的原材料的类型和数量以及它们的固化步骤和生产印制电路板的程序。它必须确保纤维之间的所有空隙被足量的树脂填充，否则这些内部的空隙可能导致基板使用寿命缩短。

聚酰亚胺是一种在极端热条件下选用的材料，例如长时间地在高温环境下组装或使用。另一个要考虑的因素是在费用较大的组装过程中更换损坏的元器件。聚酰亚胺在漂移过程中依然保持它与铜箔的粘接以使焊接温度非常合适。

它的玻璃化温度（T_g）高于 220℃，因而具有极好的高温性能。

Goosey（2003）描述了所期望的基板性能，以适应当今电子组装件不断增加的封装类型和互连密度的要求。新型基板在近几年已经发展起来，T_g 扩展到了 200℃以上，在某些特定情形下可以接近 300℃。这些基板的实例包括那些基于氰酸酯、烯丙基化的聚亚苯醚和所谓的 BT 树脂以及四功能环氧树脂系统。表 6-1 显示了一些新型基板的性能。

表 6-1 高 T_g 基材的性能（经 Goosy 同意，2003）

基　　材	T_g/℃	相对介电常数/10GHz	耗散因数/10GHz
环氧玻璃纤维（FR-4）	130 ~ 150	4.5	0.022
四功能环氧树脂	175	4.4	0.020
聚苯醚	175	3.4	0.009
环氧树脂/聚氧化二甲苯	180	3.9	0.013
BT 树脂	180	4.1	0.013
聚酰胺纤维无纺布	220	4.1	0.022
氰酸酯	240	3.8	0.009
聚酰亚胺	280	4.3	0.020
液晶聚合物	280	2.8	0.002

现在有很多种覆铜板在商业上都是可用的。它们已经按照国家和国际标准规范化，为每种覆铜板等级和重要性质的最小/最大限度制定了技术要求。通常，覆铜板应该有良好的电气、力学和环境性能，并且应该满足美国电子电路互连与封装协会（IPC）、美国电气制造商协会（NEMA）、美国国防部设计标准或军用标准（MIL）、IEC 和 ANSI 的标准规范。

6.1.3 铜箔

基板上的导电层可以用铜、镍、硬质合金或铍铜等制成。然而，由于铜的可用性、成本和性能等方面的优势而使它成为被最广泛使用的材料。铜箔可以放在复合材料的单面或双面，这取决于需要和使用的要求。

印制电路板的质量在很大程度上取决于铜箔的性能，因此对铜箔的质量要求是非常严格的。铜箔的厚度通常用盎司每平方英尺（oz/ft^2）表示，这相当于大约 $3.052g/cm^2$ 或 $305.2g/m^2$。

通常，在基材的单面或双面上粘贴一层厚度为 17.5μm、35μm 或 70μm 的非常薄的铜箔。由于可以用 1/2oz 铜来获得 $1ft^2$ 17.5μm 厚的铜箔，故 17.5μm 厚的铜箔也意味着 1/2oz。通常现货供应的铜箔是重达 136 ~ 181kg（300 ~

400lb㊀）的一大卷。表 6-2 给出了常用铜箔的标准厚度。绝大多数的基板使用 305g㊁/m^2 或重量更轻的铜箔，其重量公差通常为 ±10%。

表 6-2　铜箔的标准厚度和重量

厚度/μm	重量			表面电阻率（最大）/MΩ
	基本重量		公差	
	oz/ft^2	g/cm^2		
12	3/8	107	±10%	9.3
18	1/2	153	±10%	7.0
35	1	305	±10%	3.5
70	2	610	±10%	1.8

铜箔必须满足严格的质量要求。它的电阻率在 20℃ 时不应该超过 0.1594 Ω · g/m^2。铜箔不能有针孔、凹点、划痕及结瘤。可用的铜箔有两种形式：压延退火铜箔和电解铜箔，这些内容将在下面的内容中详细叙述。

6.1.3.1　压延退火铜箔

压延退火铜箔的生产，是把电解形成的铜阴极熔化浇铸成大的铜块，再把铜块通过专门设计的压延和退火热轧，从而得到大卷的铜箔。这种方式生产的铜箔的宽度范围为 635（最小）~965（最大）mm。

压延铜的纯度达 99.9%，并且具有良好的水平颗粒结构。压延铜箔主要用在柔性印制电路板制造流程中。尽管这种铜箔的生产比较容易，但它也有一些缺点，如宽度有限、焊接性差以及由于颗粒结构畸变而引起的附着力及延展性问题。压延铜箔是用高温下退火的电解铜生产的，因而也叫做高温高延展性（HTE）铜箔。HTE 铜箔是最具延展性的铜箔，因此其在微波应用领域得到了广泛应用。

6.1.3.2　电解铜箔

电解铜箔是通过电镀的方法生产的。电镀槽中，铅或抛光的不锈钢滚筒用作阴极，纯铜用作阳极。两者都浸到硫酸铜溶液中，如图 6-1 所示。

沉积的铜在抛光的滚筒上的附着力较差，很容易剥离。剥离下来的铜箔一面非常光亮而另一面则是暗淡的毛面，毛面增加了与粘结剂之间的附着力，其纹理结构在自然状态下按大小纵向排列，具有极好的结合力。毛面还会受到进一步的处理，通过化学氧化作用增加其表面粗糙度，从而提高附着力。电镀铜箔卷的宽度可高达 1970mm。

铜箔的纯度为 99.5% 左右，它的电阻率在 20℃ 时为 0.1594Ω · g/m^2。如

㊀ 1lb = 0.45359237kg。

㊁ 1g = 0.06479891g。

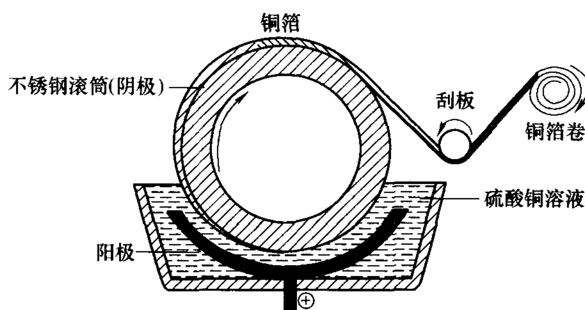


图 6-1 制造电解铜箔的电镀槽

今，厚度为 5μm 和 9μm 的薄铜箔可用于多层和刚性印制电路板的制造。薄铜箔的优点包括非常快的蚀刻时间、更少的蚀刻剂消耗、消除了光阻剂结合的预处理，以及更好的光阻剂附着力等。

6.2 基板的制造

覆铜板是通过在加热和加压条件下把浸渍树脂的填充材料层和铜箔压合在一起而制成的，通常使用液压机来完成这项操作。

下面将详细讨论关于工业标准的 FR-4（覆铜箔环氧玻璃布层压板）材料的加工过程，该过程可以被推广到包括今天所有可用的基板类型。

6.2.1 材料

基板制造所需要的材料是玻璃纤维（填充物）、环氧玻璃布板（树脂）、溶剂和铜箔。

6.2.1.1 玻璃纤维布

玻璃纤维布在大多数基板中起主要的增强结构的作用。玻璃纤维提供的刚性和强度与环氧树脂的粘接、密封和绝缘性能相辅相成。这些单股的玻璃纤维细线是构成玻璃纤维布的基本要素。线状的纤维被放到一起形成纱线或纱束，接着像编织其他任何类型的织物一样，大量的纱线在布料制造厂中被编织到一起。不同的细线和纱束直径的组合、细线支数和编织密度以及其他参数等的控制将制成多种厚度和重量的玻璃纤维布。最后，玻璃纤维布还要用设备涂覆树脂进行整理，使树脂浸渍和附着到织物上。

6.2.1.2 环氧树脂

树脂的作用是像“胶水”一样使基板粘接在一起。环氧树脂可以在不同的生产阶段从不同的厂家购买。可以购买液态的环氧树脂，这样可以使用私有配方和工艺流程把它调和成适用的树脂；也可以购买进一步加工或调和好的固态

树脂，它已经完成固化和催化，可以直接投入使用。

6.2.1.3 铜箔

大多数用 FR-4 制造的铜箔是电镀类型的铜箔，这些铜箔通过把铜电镀到部分浸到电镀溶液中的缓慢旋转的滚筒状的阴极上而制成。当滚筒旋转时，电镀沉积的铜以持续的速度被从阴极滚筒上剥离。不同的滚筒转速和电流强度可以改变铜沉积的速度，从而改变所得铜箔的厚度。在这个阶段得到了“原始”铜箔，然后要进行不同的预先设计好的加工，以增加毛面的表面粗糙度，从而增加它与基底的机械粘接力。另外，铜箔要被涂上一层很薄的保护涂层薄膜，以防止在成层和贮存期间铜的氧化。

6.2.2 制造流程

三种主要的原材料——玻璃纤维布、树脂、铜箔在层合机的压合下得到完全处理好的最终产品，它在印制电路板的制造过程中具有空间稳定性以及抗湿气、抗化学制剂和抗热偏移性能。制造流程就是把主要的原材料薄片结合在一起，如图 6-2 所示。

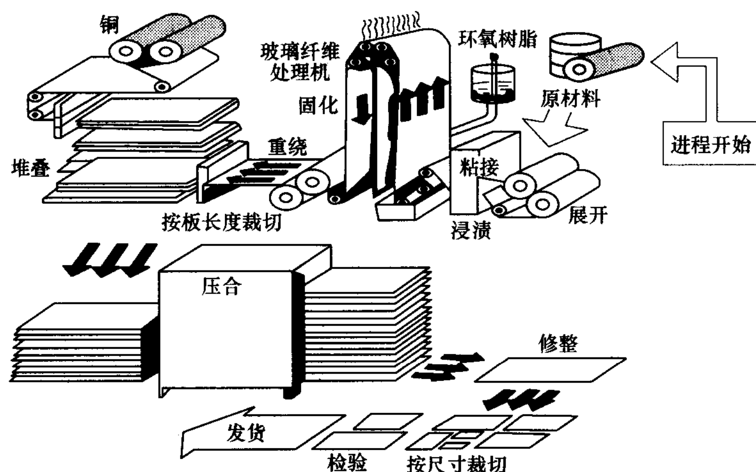


图 6-2 基板的制造流程（经通用电气公司《电镀材料》允许，2001）

6.2.2.1 处理

处理指的是将液态树脂被应用到玻璃纤维布上的过程，通常经由浸渍和计量滚筒的组合作用。接着，处理过的玻璃纤维布要通过一种可控热源使树脂半固化，这种热源是一种干燥炉，它是空气循环或红外线类型的，可以长达 40m。大多数的被浸渍到玻璃纤维布中的挥发物此时已经干燥，这个阶段通常被称作预浸料坯阶段或“B”阶段。

由于浸渍和测量过程很关键，在处理中必须进行严格的过程控制。既要使

玻璃纤维布被树脂完全浸润，又要精确控制树脂的吸收量，这对保证基板的一致性和质量是极为重要的。实际上，树脂与基材的比率、最后的半固化胶片的厚度和树脂聚合的程度需要被监控。

6.2.2.2 叠合

叠合是把处理好的半固化胶片和铜箔组合好以便压合。在这步操作中，铜箔首先被放置在一块大的抛光的不锈钢板上，接着，一些半固化胶片被放在铜箔上。叠放层数的多少取决于需要的基板厚度。如果需要材料两面都有铜箔的话，应把最后一张铜箔放在半固化胶片之上。倘若只要求一面有铜箔，那么用一层隔离膜来取代一面的铜箔。

6.2.2.3 压合

压合是把热量和压力同时加到叠合好的板堆或叠板（即半固化胶片、铜箔以及可能有的隔离膜）上，生产出完全处理好的基板的过程。这步操作是通过液压机完成的，能够把压强提高到1000psi[⊖]英寸（psi）。蒸汽是典型的热源。板堆或叠板每次压合时，典型的操作是压制 80 张 36in × 48in 或 250 张 48in × 144in，1/16in 厚的基板。

在压合过程中，半固化环氧树脂会液化及流动，从而逐步排出侵入基板中的空气或其他气体。这种流动可以起到密封铜箔的处理面、促进铜箔粘接，并且使树脂在每层中均匀分布的作用。一段时间之后，在液化树脂中的环氧树脂群组开始形成交联，逐步使树脂固化。热电偶被放进一些基板中以监察和控制温度，在这期间定时器对按照预先设定的固化周期自动记录时间。

当固化完成时，蒸汽被自动切断，压力减小到开始的状态，压合的叠板被冷却到可以处理的温度（80°F）。从液压机中取出后，基板的边缘会被修剪，以去除不规则的过量溢出的树脂。在这个阶段，基板被裁剪成为所希望的板件或面板尺寸。

在制造流程中，需要进行一些质量控制检查，以保证基板厚度的一致性、层压结构的完整性（对极端温度、恶劣的机械及化学条件的耐受性）、不产生板弯和板翘、表面质量和介质的变化。基板制造流程的知识对设计、制作和装配人员了解印制电路板生产中关键的建构块的性能和层压结构是有帮助的。

6.2.2.4 质量控制

基板在制造完成后要经历各种测试。它们要被进行下列检验：

1）洁净度；

2）板弯和板翘；

3）边缘；

⊖ psi，即 p. s. i，为“磅/平方英尺（lb/ft^2）”的略语。——译者注

4）耐燃性；
5）划痕；
6）空间稳定性；
7）厚度；
8）树脂含量；
9）吸水性；
10）挥发物含量；
11）漂锡测试（焊料阻力）；
12）树脂流动和胶化时间；
13）粘接强度；
14）印制适应性；
15）抗弯强度；
16）可钻性；
17）剥离测试；
18）冲孔和剪切性能。

6.3 基板的性质

基板的性质随等级的不同而不同，这取决于树脂和填充物。基板的电气、力学、化学和热学性能主要取决于所选用的树脂。基板的性质是：
1）介电常数；
2）冲击强度；
3）介质击穿强度；
4）环境影响；
5）介电强度；
6）抗霉性；
7）耗散因数；
8）可燃性；
9）耐电弧性；
10）自熄性；
11）损耗因数；
12）层压难度；
13）吸水性；
14）铜附着力；
15）抗拉强度；

16）耐热性；

17）压力；

18）可加工性；

19）剪切力；

20）空间稳定性；

21）抗弯强度。

基板的电和力学性能受环境因素，比如湿度、温度、腐蚀性气体等的影响。表6-3列举了印制电路板制作中通常用到的基板的重要性质。

表6-3 主要基板的重要性质

等级	成分	备注
XXXPC FR-2 XXXPC	纸/酚醛	高防潮性 与XXXPC相似，但阻燃剂不同 纸/酚醛等级最好的力学性能
FR-3 FR-4	纸/环氧树脂 玻璃/环氧树脂	很高的力学和电气性能，阻燃剂 阻燃剂，化学耐受性，低吸水性
G-3 G-5 G-9 G-10	玻璃/酚醛 玻璃/三聚氰酰胺 玻璃/三聚氰酰胺 玻璃/环氧树脂	高抗弯强度和空间稳定性 高阻抗，高抗冲击强度 与G-5相同，但具有更好的电性能 与FE-4相同，但不含阻燃剂
G-11	玻璃/环氧树脂	与G-10相同，但在加热条件下具有更高的抗弯强度
G-30	玻璃/聚酰亚胺	在加热条件下具有更好的空间稳定性，阻燃剂
FR-5 GPO-1 GPO-2	玻璃/环氧树脂 玻璃/聚酰亚胺 玻璃/聚酰亚胺	与G-11相同，但阻燃剂不同 通用的机械和电气等级 与GPO-1相似，但可燃性低

6.3.1 电性能

基板的电性能取决于填充物、固化的树脂以及固化反应副产品的电性能。

当曝露在高湿度环境中时，基板会吸收一定量的湿气，从而对基板的电性能造成不利的影响。对1.6mm厚的基板来说，可容忍的吸水率如下所示：

1. 纸质酚醛树脂

实例：NEMA等级X、XX、XXX等　　0.75%～6%

2. 玻璃环氧树脂

实例：NEMA等级G10、G11　　0.23%

3. 玻璃PTFE（聚四氟乙烯）

实例：NEMA等级GTE　　0～0.68%

6.3.2 介电强度

这是指绝缘材料阻止在电压作用下形成的击穿放电电流通过的能力。它取决于材料的诸多属性，比如化学成分、分子结构、潮湿程度、厚度、表面洁净度和表面粗糙度及材料的老化程度。

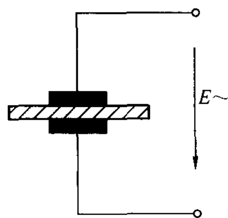


图 6-3 介电强度测试的电极布置示意图

这种测试通过把 50Hz 交流电压加到一块基板上进行，在把基板放到两个电极中间之前，铜箔面要被蚀刻掉，如图 6-3 所示。测试用以下两种方法在油内进行：

1）短期测试：在这种测试中，电压以 0.5kV/s 的速率均匀增加；

2）步进测试：开始施加的是 50% 的短期测试的击穿电压，然后电压按照预先确定的增量以 1ms 的时间间隔逐渐增加。介电强度的测试值随电极的形状和尺寸、电压的波形和频率以及外围物质的不同而变化。

6.3.3 相对介电常数

相对介电常数是给定介质的电容器的电容量与以空气为介质的同样电容器电容量的比值（见图 6-4）。介电常数可以通过从电容电桥读出的电容量、样本的厚度和电极的面积计算出来。

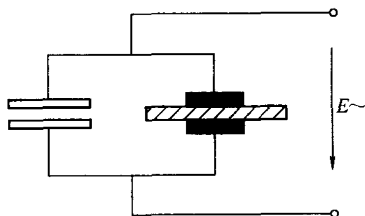


图 6-4 相对介电常数测试的电极布置

相对介电常数也被称作相对电容率，作为一个比值，它是一个无量纲的量。

介电常数表征了绝缘材料存储静电能量的能力。它随材料的厚度、温度、湿度和频率及化学成分的不同而改变。对于不同的材料、温度和频率的变化对介电常数的影响不同。

6.3.4 耗散因数

绝缘材料的耗散因数是在材料中总的功率损耗（以瓦为单位）与以这种材料为介质的电容器中电压和电流的乘积的比值。它随频率、湿度、温度等变化，是一个无量纲的量。

换句话说，耗散因数是并联电抗与并联阻抗的比值。它可以通过如图 6-5 所示的电极装置测量，而图 6-6 表示的是对应的等效并联电路的矢量图。

耗散因数可以表示为 $\tan\delta$（损耗角 δ 的正切值）。它与基板中电阻的功率损耗直接相关。因此，对于高功率损耗的电子电路来说，最好使用耗散因数低的

基板。不同的填充物和树脂成分基板的耗散因数值是：

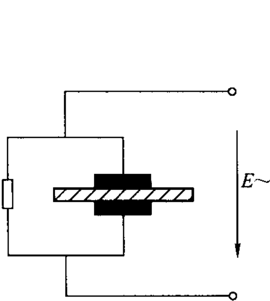


图 6-5 测试耗散因数的电极装置

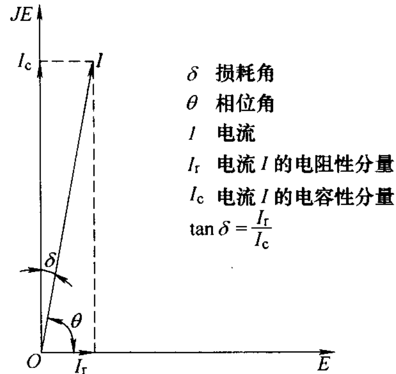


图 6-6 一种基板耗散因数测量的等效并联电路的矢量图

1）纸质酚醛树脂基板　　0.02～0.08

2）玻璃环氧树脂基板　　0.01～0.03

3）玻璃聚四氟乙烯（PTFE）基板　0.0008～0.005

基板的耗散因数随频率、温度及吸附的湿气有如下变化：

1）频率提高可使耗散因数减小；

2）温度升高可使耗散因数变大；

3）湿度增加会使耗散因数成比例地上升。

这就是说，在数据表中给出的耗散因数一定与确定它的外界条件相关。

6.3.5 绝缘电阻

绝缘电阻是基板中电压与电流的比值。尽管绝缘电阻的绝对值开始就很重要，但在指定的环境条件下阻值的变化通常更有意义。绝缘电阻根据环境条件以及测试样本的加工工艺不同而不同。因此，在测试绝缘电阻时，样本的测试环境要与其最终的应用环境相同。在覆铜板中，绝缘电阻包括体积电阻和表面电阻。

6.3.6 表面电阻率

表面电阻率是指漏电流沿绝缘材料表面流过时所呈现的电阻。它取决于表面湿度、洁净度、光洁程度、温度以及其他的环境条件。

绝缘材料表面两个检测点之间的表面电阻是加到这两个点之间的直流电压与流过它们之间的总电流的比值。这种测量使用如图 6-7 所示的一种三电极的环形系统。通过蚀刻把金属箔完全去掉，但在样本上留下金属箔的轮廓以作为电

极的边缘而构成电极。保护电极在反面，它保持一个正电位，以防杂散电流通过基板。通过加载500V的直流电压，并使用绝缘电阻表进行测量。

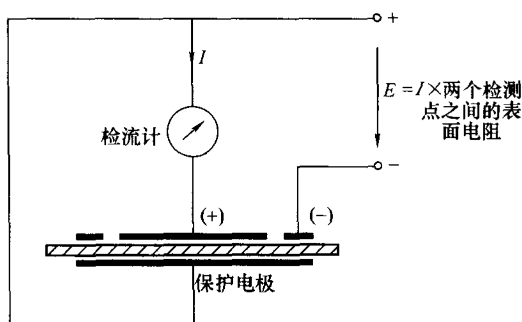


图 6-7　测量表面电阻率的电极装置示意图

表面电阻率也间接地与介质材料的化学成分有关。高吸湿性的材料可使表面电阻率减小，这可以从图6-8中明显地看出来。已经发现，湿度对玻璃环氧树脂材料的表面电阻率的影响是湿度每增加20%，表面电阻率以大约10倍的速率按对数规律减小。

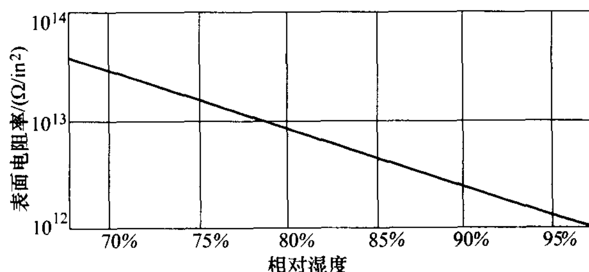


图 6-8　玻璃环氧树脂材料的表面电阻率随相对湿度的变化规律

6.3.7　体积电阻率

体积电阻率是指漏电流通过绝缘材料主体时所呈现出来的电阻。换句话说，体积电阻是加到嵌入材料内的电极上的直流电压与流过材料的电流的比值。它通常用Ω·cm表示。

体积电阻还可以通过使用如图6-9所示的三电极法测量。体积电阻率可以由下式得出

$$\text{体积电阻率} = \frac{R \times A}{t}(\Omega \cdot \text{cm})$$

式中，R 为电阻测量值（Ω）；A 为保护电极的面积（cm^2）；t 为样本的厚度（cm）。

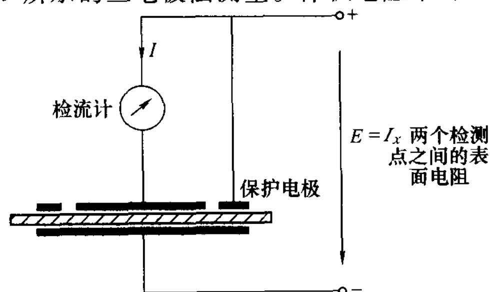


图 6-9　测量体积电阻率的电极装置示意图

体积电阻率受材料的化学性质、温度以及样本中吸附的湿气等因素的影响。通常，它随温度的升

高而快速减小。体积电阻率因为与基板的吸湿性有关而成为其最重要的电气性能之一。PTFE 等体积电阻率不随湿度变化而改变的基板为高频应用的首选。

6.3.8 介质击穿

介质击穿是对垂直插在基板中、中心距离为25.4mm 的两个电极之间进行击穿放电的测量。这种测量在油中进行，和测量介电强度的方法相似。1.59mm 厚的材料的介质击穿相关数据如表6-4 所示。

表6-4 介质击穿数据

序号	材 料	击穿电压/kV
1	XXX PC 和 FR-2	15
2	FR-3 和 FR-6	30
3	CEM-1、CEM-3、G-10、G-11、FR-4 和 FR-5	40
4	GT 和 GX	20

6.4 基板的类型

6.4.1 酚醛基板

酚醛基板用酚醛树脂制成，这种树脂由苯酚和甲醛在溶剂中的反应产物经脱水缩合反应而形成。酚醛树脂经纸质填充物强化，再把铜箔压在基材上，因此，它们也被称为“酚醛纸覆铜板”。

第一种基于酚醛树脂的基板可能就是众所周知的酚醛布。它用布和酚醛树脂制成，树脂用合适的溶剂溶解形成溶液从而可以用来浸渍布料。然后，浸渍树脂的布被裁切成片，堆叠成堆并且放在两块制板过程中用到的加热板中间。温度和压力的共同作用使得树脂熔化并且流动形成一个整体。这样，经过制板周期的最后环节，一种十分坚硬的刚性基材就制好了。

实质上，酚醛布现在已经被酚醛纸所取代了。按照美国电气制造商协会(NEMA) 的标准，基板的等级分为 X、XX 和 XXX，这意味着酚醛树脂的含量大约分别是35%、45%或55%，其余的是纸和其他填充物以及添加物。对于这些基板来说，X 和 XX 等级的性能很差，因而很少使用。XXX 级是经过进一步改良的材料，可以分为 XXP 和 XXXPC 级，这里的 P 是指可冲性，PC 是指冷冲加工。它们的性质概括如下：

1）XX 级：酚醛纸树脂，具有平均的电气性能、良好的力学性能，不适合冲孔，对钻孔机的磨损较小。

2）XXP 级：与 XX 级相似，但在高温（200~250°F）下能被冲孔。

3）XXX 级：树脂的含量高于 XX 级，具有较好的电气和力学性能，适合在射频领域中应用。

4）XXXP 级：与 XXP 级一样，但含有更多的树脂，适合最普通的使用目的。

5）XXXPC 级：与 XXXP 级一样，但可以被冷冲孔（70～120°F），具有较高的绝缘电阻、较低的吸水性，很适合在高湿度领域应用。

酚醛树脂基板有良好的冲孔性，便于加工。它们的价格也相对低廉，因此获得了最广泛的商业应用。酚醛纸基板的一个缺点是它们较差的耐电弧性以及比环氧树脂基板更高的吸水性。图 6-10 显示了湿度对酚醛纸基板表面电阻率的影响。

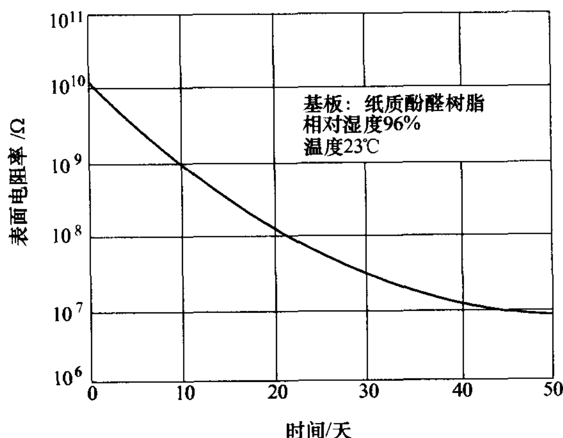


图 6-10　温度对酚醛纸基板的表面电阻率的影响
（经 Bosshart 同意重绘，1983）

6.4.2　环氧基板

基板被环氧树脂和用作填充物的玻璃纤维或纤维纸所强化，再把铜箔压合在上面，从而得到覆铜板。因此，根据所用的填充物的种类它们被叫做“环氧玻璃布覆铜板”或“环氧纸覆铜板”。在制板过程中，通过加热、加压和添加催化剂的作用使环氧树脂固化。最终的产品是既不可逆也不溶的热固性树脂，它们可耐受除氧化酸之外的所有化学品，除了在高温下，几乎不会损坏。环氧树脂的一些特殊性质是：

1）在固化过程中很低的收缩率；

2）材质坚硬；

3）具有优异的粘接力；

4）表现出很高的机械强度；

5) 具有很高的耐碱性以及极好的耐酸和耐溶剂的能力；

6) 在大范围的温度和频率条件下展示了良好的电气性能，它们是优秀的绝缘材料，具有很高的介电强度；

7) 优异的防潮性和较低的吸水性。

环氧树脂通常与高品质的增强材料，如玻璃纤维布和复合材料等组合，呈现出异常高的机械强度和优异的电气性能。

6.4.3 玻璃布基板

玻璃布用于生产环氧树脂强化的玻璃布基板。G-10、G-11、FR-4 和 FR-5 等就是一些现在可用的玻璃布基板种类。玻璃纤维或细丝的直径通常为 9.6μm (0.38mil)。在编织厂，它们被集拢到一起，经过纽绞成线，然后编织成玻璃纤维布。它们的线型各不相同，玻璃纤维布的网线以每英寸布料中线的数目表示。1.6mm 厚的基板含有 8 层玻璃纤维布，如果钻一个直径为 1mm 的孔，就会切断大约 10000 根细丝。在孔壁中的玻璃纤维将会有 20000 个端子。Spiak 和 Valiquette (1994) 阐述了制板工业寻求质量更好、生产更迅速的材料的趋向。表 6-5 给出了基板材料的物理性能。

表 6-5 基板材料的物理性能 (经 Lucas 同意，1993)

材料类型	T_g /℃	介电常数		传播延迟 / (ps/in)	含水率	铜箔剥离强度	
		树脂	w/E-玻璃		吸收	在 25℃ 时 /lb/in²	在 200℃ 时 /lb/in²
标准 FR-4	135	3.6	4.4	178	0.11	11.0	5.7
高性能 FR-4	180	2.9~3.6	3.9~4.4	168	0.04~0.20	9.0~11.0	7.5~7.9
聚酰亚胺	220	3.4	4.3	176	0.35	8.5	8.0
BT 树脂	195	3.1	4.0	170	0.40	8.7	5.2
氰酸酯	240	2.8	3.7	163	0.39	8.0	6.3
硅碳树脂	190	2.6	3.4	156	0.02	5.0	5.0
PTFE	16	2.1	2.5	134	0.01	10.0	8.0

印制电路板制作应用最广泛及产业界的标准基材是强环氧玻璃纤维布或 T_g 值达 135℃ 的 FR-4。它的相对介电常数大约是 4.4，传播延迟大约是 178ps/in，这些基板采用一层或多层环氧树脂浸渍的玻璃纤维编织布。FR-4 因为其性能适合大多数应用领域中对电气和力学性能的要求而成为应用最广泛的材料。它们表现出很高的机械强度和可加工性、允许钻孔性、热稳定性以及达到 V-O 级的阻燃性。对单面和双面板的设计来说，它们具有加工的灵活性，而且其成品板的性能又适合于许多表面贴装技术应用的需要。然而，下列更高的性能要求

(Guiles, 1998) 使新材料的发展成为了必需:

1) 板子能满足特殊的耐热要求，也就是说，在很小的空间内要处理高度集中的能量;

2) 大的或高层数的板子制造的复杂性要求，包括需要准确对位的复杂的蚀刻图样;

3) 由于特殊的装配技术（倒装晶片、板上芯片技术）或提高可靠性的要求，板子需要有可控的热膨胀性能;

4) 板子需要具备特殊的或苛刻的电气性能，特别是那些为保证低传播延迟、较低的串扰和较高的时钟速度而要求的低介电常数，为了保证低衰减、较好的信号完整性、较高的时钟速度而要求的低耗散因数以及在便携式电子设备中的低功耗要求。

基板的一个重要的物理性能是 z 轴方向的膨胀总量，膨胀发生在电路板的制作和随后的组装件的使用中，首先是一连串焊接温度引起的偏移，然后是使用环境中操作温度引起的偏移。z 轴方向尺寸膨胀的有害影响是铜柱体（镀通孔）的加工硬化。z 轴方向膨胀较低、结构硬化总体上较低以及电子组装件的使用寿命较大则源自基板的发展（Lucas, 1993）。

Ehrler (2002) 检验了多种环氧材料和增强物的性质，它们改善了印制电路板的电和热力学性能，代表了新材料的发展方向。如图 6-11 所示，在低至 T_g 点而高达焊接温度这个扩大的范围内具有较低的 z 轴方向膨胀，从而能提高通孔的可靠性。这通常是通过增加材料的交键[⊖]而实现的。FR-4 材料具有高 T_g 点（180℃），减小了 z 轴方向膨胀，因而其空间稳定性更好，这对复杂的电路板来说是很重要的，因为芯板不需要像常规的 FR-4 那样加热到高于 T_g 点很多的温度，同时，增强了基板对于应力缺陷的抵抗力，提高了产品的预期寿命。这种高性能的 FR-4 基板和标准的“E”类玻璃增强材料一样，具有低到 3.9 的介电常数和 168ps/in 的传播延迟。然而，一些高 T_g 点的 FR-4 树脂的热稳定性和常规的 FR-4 并不匹配，并且它们的铜箔剥离强度较低。

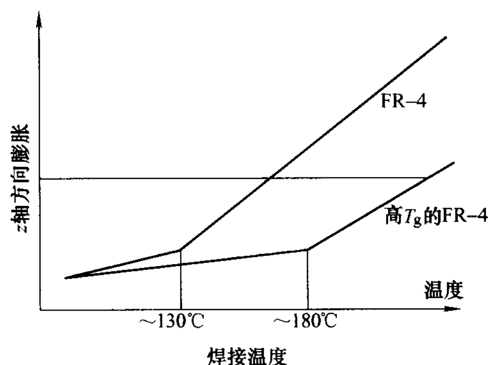


图 6-11 当焊接温度增加时 FR-4 和高 T_g 的 FR-4 材料的 z 轴方向膨胀（经 Ehrler 同意，2002）

⊖ 交键，是指通过支联形成的化学键。——译者注

Lin (2003) 描述了 NPLD 系列材料的性能，具有合乎需要的高 T_g 点 (200℃)、低介电常数 (3.5～3.9) 和耗散因数 (0.038～0.01)。这些材料提供了改良的热介电性能和耐潮性，它们最适合在 GHz 的频率范围内应用。

6.4.4 半固化树脂材料（B 阶段树脂材料）

环氧树脂被广泛用在 B 阶段或半固化材料的制造中。当表氯醇[⊖]和双酚-A[⊜]两种单体被混合在一起后就得到了一种聚合物。这种聚合物叫做 B 阶段树脂，可以被软化及被某些溶剂溶解。这种树脂和纸或玻璃纤维布等填充物混合而得到 B 阶段环氧树脂材料，并被用在多基板的制作中。

它们具有较好的化学和溶剂耐受力以及高温下较低的 z 轴方向膨胀等性能。

6.4.5 PTFE（聚四氟乙烯）基板

聚四氟乙烯是一种热塑性材料。当用玻璃纤维强化后，它制成的基板具有几个优点，特别是在高频 (RF) 和微波应用领域。构成复合材料的树脂和玻璃纤维布的厚度分布影响介电常数和介质损耗因数的均匀性。随着微波印制电路板成为主要的运行部件，介质性能的改变不可避免地导致了基板性能的降低。PTFE 玻璃纤维布基材在尺寸达 1220mm×914mm (48in×36in) 的整张基板的制造中具有精确的厚度分布，误差为 0.02±0.0015in，板边没有任何的锥形突起。另外，PTFE 基板在较宽的温度、湿度和频率范围内具有很低的介电常数和耗散因数。

PTFE 的分子结构使得基材具有极低的吸湿率 (<0.02%)。当热塑性材料被加热时既有化学变化又有相位改变。它们的分子构成一种三维的交联网格，一旦被加热并成型后，它们就不可以被再加热和重组了。应用在微波领域的基板由热固性树脂制成，表现出极高的使用价值。湿气的影响会导致基板电气性能的降低，特别是对于阻抗，这是很容易理解的。因此 PTFE 提供了非常高的电气强度，哪怕是在苛刻的环境条件下都具备电绝缘性能。因此，除了用在射频和微波领域，PTFE 基板还经常被用在那些在潮湿条件下仍需要维持高绝缘电阻的地方。典型的例子是高阻抗的输入端或低电流测量设备和放大器。

PTFE 的更大优点是具有较高的层间结合强度以及基于此的铜箔剥离强度。在重新装配过程中，部分导体要暴露在非常高的温度下，这就需要较高的剥离强度。即使只有 0.5oz/ft² (厚度为 17.5μm) 铜箔的 PTFE/玻璃纤维布也表现了最小 1.8N/mm (10lb/in) 的剥离强度。

⊖ 表氯醇，即氯甲代氧丙环 (C_3H_5OCl)。——译者注

⊜ 双酚-A，即 2，2-双对羟苯基丙烷。——译者注

PTFE基板不使用任何阻燃剂就可满足UL-94、V-O等必需的可燃性等级。基于热固性树脂的微波应用基板要求很好的阻燃性，即使是牺牲其他的性能参数，比如剥离强度或基材最薄的厚度不要求满足V-O等级，这是PTFE基板的显著优势。

除了用玻璃纤维布作为PTFE的填充物，陶瓷填充物的PTFE基板也已经被开发出来，它不仅成本低廉，而且现在已明确把它用作RF、微波印制电路板的基材。这种基板用作双面带状线结构印制电路板的制作以及多基板的应用。不同类型的环氧树脂基板如下：

1）NEMAFR-3阻燃环氧纸；

2）通用的环氧玻璃G-10，耐热环氧玻璃G-11；

3）阻燃环氧玻璃FR-4；

4）阻燃及耐热的环氧玻璃FR-5。

阻燃性能是通过用氯或溴等卤素替代树脂的一些功能群而获得的。

6.4.6 聚酯基板（迈拉基板）

聚酯基板是由不饱和聚酯树脂和可共聚的单体，比如苯乙烯制成的。用玻璃纤维作为填充物以强化聚酯，用铜箔压合从而得到聚酯基板。商业上可用的基板的等级是NEMA标准的FR-6。它们通常是有光泽的，比如白色或红色，并且相对比较便宜。它们的电气性能类似于XXXPC基板，力学性能也不相上下。它们的空间稳定性以及耐水性也很好，但在焊接之后，板弯和板翘比较大。

6.4.7 硅酮基板

硅酮树脂基板是用经玻璃增强材料加强的硅酮树脂制成的。它们对化学制剂和热有良好的耐受力，使用的温度范围为175～400℃，可根据其类型而定。在硅酮树脂系统中使铜箔和基材之间具有良好的结合性是困难的，虽然这些基板的电气性能非常优越，但其昂贵的成本限制了它们的使用。

6.4.8 蜜胺基板

蜜胺树脂可以和玻璃纤维等不同的增强材料组合在一起而制造蜜胺基板，它们具有非常高的表面硬度以及很高的耐电弧性。然而，它们的主要缺点是空间稳定性较差，特别是随着湿度的循环变化而变化。

6.4.9 聚酰胺基板

聚酰胺是由玻璃纤维布或芳香尼龙纤维或石英纤维增强而构成的基板，具有良好的电气和力学性能、较高的铜粘接强度、良好的耐热性及低z轴膨胀。它

们用在要求严格的军事和航天领域以及专用的多层电路中。然而，它们的铜箔剥离强度较差，铜箔在高温焊接后会翘起。

6.4.10 特氟隆基板

特氟隆（聚四氟乙烯）基板是通过玻璃纤维增强而得到的一种具有低介电常数的基板，它用在由小型无引线元器件构成的 RF 应用领域。由于其很高的热膨胀系数，特氟隆基板的应用范围有限。

6.4.11 混合介质基板

在当今的微波和高速数字印制电路板中，混合介质基板的使用变得越来越普遍。其中一种材料就是高速板 C 预浸料坯，它可被作为一种预浸料坯或者 HDI 电介质的一个外层提供重要的信号路由，从而在印制电路板多层中的非重要层使用低价 FR-4 提供了一种很好的解决方案。高速板预浸料坯用作一种低损耗的 HDI 介质时，可以使可控阻抗的高速数字设备、RF 和微波印制电路板等做得更薄、更轻、更快速，从而改善了它们的性能。这种产品由经过改良的 BT 树脂浸渍的膨体聚四氟乙烯（ePTFE）构成。在 ePTFE 中气隙被树脂取代，而 ePTFE 薄膜成为了载体或树脂的输送系统。整合的 ePTFE 使介质变得坚韧，提高了可靠性，并且为高密度的细线和微距电路提供了极好的表面平整性。

高速板 C 的材料具有稳定的低介电常数（2.6）和低损耗角正切(0.00036)，而且不受频率和温度的影响。它利用标准的热固性工艺抵抗熔化过程。这种材料被 M/s W. L Gore 和 Associates Inc. Newark，DE. 制作，其他的信息可以从该公司的网站 www.gore.com 中获取。

6.5 基板的评估

6.5.1 基板测试

基板的测试在许多出版物中都有描述。如 IEC Publication249、NEMA 和 ASTM（美国材料试验学会）标准 MIL-P-13949、BS4584（英国）和 DIN40802（德国）等。通常，电气和机械设计以及特殊的加工工艺要求最终的材料具有某种性能且可控。一些今天最常用的评估基板的方法如下面所述。

6.5.2 表面和外观

表面和外观的检测标准可能是最难充分定义的了。基板通常会因为铜箔表面的凹点和凹痕而报废，大多数的制板商提倡表面和外观标准只应用在已完工

的板子上，一些基板的用户要求的铜箔表面标准只在某些关键区域，比如插头插入边缘接插件的区域。在那些区域，用户通常给出一张关键铜箔区的覆盖图，明确要求制板商对每张基板的关键铜箔区域在出厂前都被检查。这样，表面标准就只应用在那些已完工的板子的有关区域了。因为超过 90% 的铜最终要被蚀刻掉，所以凹点或凹痕影响某个关键区域的机会微乎其微。

1. 空间稳定性

铜箔凹点和凹痕在表面标准中被定义，定义了凹点或凹痕的最大容许尺寸，并且提供了分值（point values）以便对所有的凹点和凹痕评定等级。根据 MIL-P-13949 标准可知，缺陷尺寸和分值如下：

缺陷尺寸（mm）	分值
0.13 ~ 0.25	1
0.28 ~ 0.51	2
0.53 ~ 0.76	4
0.79 ~ 1.02	7
>1.02	30

在被检区域内的所有缺陷分值的总和必须少于每 $645mm^2$ 30 个。划痕允许的深度为小于 140μm 或最深不超过铜箔厚度的 20%。

2. 颜色

由于不同批次的树脂颜色、所用纸质的变化或由于覆盖在铜箔上的杂质不同，一批基板的颜色与另一批基板的颜色可能发生变化。通常，有一整套样本来确定优先选用的偏差颜色。

6.5.3 吸水率

基板的吸水率必须尽可能地低。如果吸水率过高，那么当环境潮湿或在印制电路板制造过程中吸收了液体时，基板的电气性能会发生很大改变。吸收的水分可能引起焊接过程中吹气或使加热的基板起泡。

在指定的温度下把特定尺寸的样本浸入到蒸馏水中，经过一段规定的时间，通过测得总的吸水量即可得知吸水率。通常，在 20℃ 条件下，把 3 块 50mm × 50 mm 的样本浸入到蒸馏水中 24h。吸水量的平均值即为吸水率，以 mg 为单位。

另外，用增加的重量和初始重量相比的百分比也可以表示吸水率。一块 76.2mm × 25.4 mm 的基板通过化学蚀刻除去铜箔，接着通过在 107℃ 下加热 1h 干燥，冷却之后称重，并在 25℃ 条件下浸入蒸馏水中 24h，接着使表面干燥后再次称重。增加的重量与初始重量相比的百分比不能超过表 6-6 所示的限度。

表6-6　吸水率的限度　(%)

材　料	厚度/mm		
	0.79	1.59	3.17
XXXP、XXXPC、FR-2 和 FR-3	1.00	0.65	0.50
G-10、G-11、FR-4 和 FR-5	0.80	0.35	0.20

6.5.4　冲孔性和机械加工性

冲孔性是覆铜板最需要的力学性能。简单地说，良好的冲孔性意味着当基板被冲孔时，板子不会破裂、冲孔周围的铜箔不会翘起、孔的边缘和内部都是光滑的。如果基板具有一定的空间稳定性，不发生板弯和板翘，这些性能是可以实现的。

制造商应该参考有关推荐的钻孔速度并在进行机械加工操作之前考虑如何进料。板子的剖面图常有助于评估所获得的孔的性能，特别是对于通孔的电镀尤其重要。通常，剖切会显示出基板材料由于钻孔而被加热到这样一种程度——或是表面光滑、气味难闻，或是被树脂糊住，或是表面很粗糙以至于露出玻璃纤维而限制连续地镀通孔。

冲孔性可以通过模拟加工过程中的条件在模具中测量。测试模具中可以进行各种孔径、间距和结构的钻孔。仔细进行物理检查，孔的剖面图将显示获得的冲孔的类型。材料必须被仔细检查，以确保没有裂缝出现且孔周围的铜箔没有翘起。许多纸基类的基板在一批与另一批相比时会有不同的冲孔性，所以样品板必须进行宽范围的仔细测量。

一种首选的测量基板冲孔性的测试方法在 DIN53488 中已给出。这种测试要求以精确的间距在一条 120mm×15mm 的基板上冲出多个方形孔，并目测测定相邻的两个未发生龟裂和破碎的孔的最小间距。样本的冲孔性以点表示，从1（冲孔性最佳）~4（较差的冲孔性），作为最小的未破损间距和基板厚度的一个指标。这种测试对比较不同的基板特别有用。

6.5.5　剥离强度

剥离强度表示了铜箔与基材粘接力的大小。在 MIL-P-13949 中说明了剥离强度或铜粘接强度的基本测试样本，并由 NEMA 制定了标准，如图 6-12 所示。这种样本的制作除了不使用各种电镀溶液或焊料之外，使用了与用户最终产品一样的加工技术，电镀溶液或焊料的使用以后也将被检测。当测试剥离强度时，样本应该放在一个平坦的水平面上。每条铜箔的宽端被剥离大约 25mm，以便使剥离的铜箔与样本的边缘垂直。然后把剥离的箔条的末端用夹具夹紧，夹具上连着测力计或拉力试验机，并且已经过调整抵消了夹具和连接链索的重量。这

时，测力计的最小负荷被记录下来，记录下的力“*F*”与铜箔的宽度之比就是剥离强度，通常用 lb/in 宽度或 g/mm 宽度来表示。

对大多数常用的基板来说，$1oz/ft^2$ 厚度的铜箔的最小剥离强度是 0.143kg/mm，剥离强度值随铜箔厚度的变化而变化。例如，对于 XXXP、XXXPC、FR-3、FR-4 和 FR-5 等基材，$2oz/ft^2$ 的铜箔最小需要 0.1756kg/mm 的剥离强度，而对于 G-10 和 G-11 等基材，则为 0.1964kg/mm。

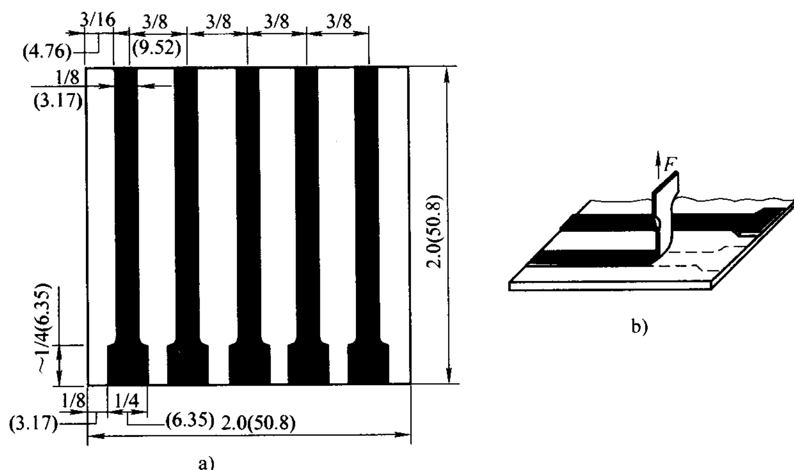


图 6-12　剥离强度测试

a）NEMA 测试示例　b）通过在铜箔上施加一个力“*F*”进行测试

6.5.6　粘接强度

粘接强度表示导体焊盘与基材粘接力的大小。由于导线与基板的分离多数情况下是从焊盘开始的，故粘接强度是一个重要的参数。粘接强度可以在成品印制电路板上或在测试样本上测量。根据建议，在一块基板的样本上钻至少 10 个直径为 50mil（1.27mm）、间距大约为 10mm 的孔，通过印制和蚀刻，环绕每个孔制作一个直径为 2.54mm 的导体焊盘，焊盘的中心与孔中心的偏移最多不能超过 4mil（0.1mm）。接着用 AWG-20[㊀] 镀锡的铜线卡钉把样本装配好，在波峰焊机上按照标准的操作规程焊接样本，突出在焊接面的引脚以垂直于基板的方向被拉出，记录下引起焊盘脱落的力的数值。图 6-13 为进行粘接强度测试的装置，最少应进行 8 次测试，并且对 XXXP、XXXPC 和 FR-2 基材，其平均值不应该小于 4.0kg（8.8lb）；对 G-10、G-11、FR-4 和 FR-5 基材不应小于 8.0kg（17.7lb）。而且最小值不应小于平均值的 70%。

㊀ 美国线规，相当于直径为 0.813mm。——译者注

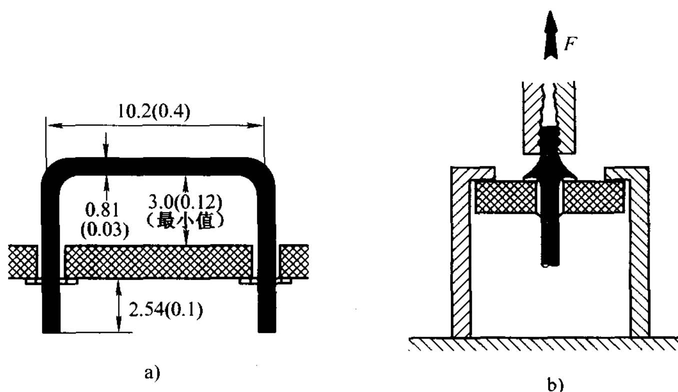


图6-13 测试粘接强度的装置
a）样本的尺寸 b）测试装置

可以用同样的测试（从元器件面牵拉引脚）来测定焊料的强度，提供的镀锡铜线要具有高焊接性。

6.5.7 耐焊锡性

基板对焊锡的耐受性可以通过把一块样本漂浮在260±3°C（500±5°F）熔融的焊锡表面一段给定的时间，通常持续10~60s来确定。样本上必须有和用在被加工的印制电路板上相同类型的铜箔和孔（未经电镀或镀通孔），样本不能被助焊剂处理过。为了防止被焊锡浸润，一层薄薄的硅脂或油被用来达到此目的。在漂浮之后，样本被目测以检查起泡、晕圈、白斑等现象。

6.5.8 板弯和板翘

板弯是沿着一张基板的边缘翘曲，而板翘则是沿着对角线的翘曲。过度的弯曲或扭曲在印制电路板加工和装配的不同阶段都会带来问题。板弯和板翘的测量可通过选取一块边长为914.4mm的方形或短边不少于610mm的长方形基板样本来进行。

根据定义，如果样本发生板弯，则当被放到一个平面上时，它所有的四个角都会和支撑面接触。为了测量板弯，应把样本放在支撑面上，它所有的角都与支撑面接触。沿着每条边，测得与支撑平面的最大偏差，并用与边长的百分比表示。

同样地，如果样本至少有一个角不能接触到支撑面，那它就是板翘。为了测量板翘，把样本支撑在这些角上，并在这些支撑角构成的三角形内部测量最大偏差。于是测量支撑面到非支撑面的夹角并测量支撑面对于板的另半边的最大偏差。对于另半边的最大偏差板翘值通常用与样本对角线的百分比表示。

MIL-P-13949 标准规定了板弯和板翘值。

6.5.9 抗弯强度

抗弯强度是指当一条基板的两端被支撑时，在中间施加一个力，而基板不发生断裂时每单位面积所能承受的力的大小。图 6-14 为测试抗弯强度的装置。

抗弯强度的值在两个方向，即在平行于填充物的长度方向（纵向）和垂直于它的方向（横向）上是不一样的。为了测量抗弯强度，样本需要有 25mm 宽，长度至少是基板厚度的 20 倍。支撑点的跨度通常是厚度的 16 倍。取 5 个样本，每个样本都进行相应两个方向（纵向和横向）的研究，在两个方向的最小平均值即为抗弯强度。

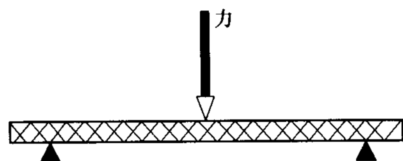


图 6-14 抗弯强度测试

6.5.10 可燃性

工业中所用材料的易燃性问题的提出引起了人们的广泛关注，因此需要制造和使用更多的耐火基板。测试可燃性的标准已经由 IEC、NEMA 和 UL（美国保险实验所）制订。

UL94 是一种塑性材料可燃性测试的通用标准。根据这个标准，材料的可燃性试验被分为 94V-0、94V-1、94V-2 和 94HB 等类别。测试在水平或垂直位置，且在一个不通风的箱子内进行。选取的样本长为 127mm、宽为 12.7mm。在进行测试之前，样本要在温度为 23℃、相对湿度（RH）为 50% 的条件下放置 48h。测试所用的装置和整套设备在标准中有详细叙述。

不同测试的分类如下：

1. 垂直燃烧试验（94V-0、94V-1、94V-2）

1）样本必须在规定的时间内熄灭

10s（94V-0），

30s（94V-1、94V-2）；

2）对一套 5 个样本，总的燃烧时间不能超过

50s（94V-0），

250s（94V-1、94V-2）；

3）不能有燃烧的火星，以免引燃下方干燥的医用脱脂棉（94V-0、94V-1），当样品直接燃烧时，可能会有火星溅出。

4）在第二次燃烧试验后，样品燃烧的持续时间不超过

30s（94V-0），

60s（94V-1）；

2. 水平燃烧试验（94HB）

1）在76.2mm跨度上每分钟的燃烧不能超过76.2mm；

2）在火焰燃烧到102mm处的参考标记之前，样本的燃烧必须停止。

6.5.11 玻璃化温度

玻璃化温度（通常表示为T_g）是衡量基板的树脂结构抵抗因热导致软化性能的明确的指标。在T_g点，树脂从光滑的状态开始发生变化，它的分子链结合力开始减弱，足以引起物理性能的变化（空间稳定性、抗弯强度等）。FR-4环氧树脂的T_g点为115～125℃，而聚酰亚胺的T_g点为260～300℃。在某种程度上，T_g点是膨胀总量的一个指标，膨胀将产生在从使用环境到焊接的各个阶段。

6.5.12 空间稳定性

电路密度的增加导致对电路板空间稳定性要求的进一步提高。在x、y轴方向的空间稳定性是基板增强材料（玻璃或纸）的作用，而"z轴"方向的厚度膨胀通常是结构或树脂基体的作用。

z轴方向膨胀：发生在z轴方向的膨胀总量。电路板以及随后的组装件，首先要曝露于焊接温度下，引起一系列的偏移，然后处于周围环境和操作温度中，直至寿命的终结。z轴方向膨胀的有害影响是铜孔（镀通孔）的加工硬化。对于基板而言，z轴方向膨胀越小、总的加工硬化也就会越小，电子组装件的使用寿命也就越长。理想情况下，如果基板的z轴方向膨胀等于镀通孔所引起的膨胀，那么应力以及伴生的加工硬化将可能被真正消除。根据实践经验，基板是因为适合某种特定的性能要求而被选用的，大多数选择是依据玻璃化温度作出的。

6.5.13 铜粘接强度

这通常通过"剥离强度测试"来测试。因为这种测试是破坏性的，所以它不会在成品板上进行，而且要求供应商随每批产品准备一些测试样本。

6.6 几个常用标准

1）IPC/JPCA4104：高密度互连（HDI）及微孔材料规范。包括可以用来制造HDI和微孔的各种导电和绝缘材料，也包括这些材料用作感光介质层的干膜和湿膜、环氧混纺产品和涂胶铜箔时的条件和适应性要求。

2）IPC-4103：高速高频用基材规范。包括对主要用在刚性或多层高速高频电气和电子电路印制电路板制造的高速/高频基板或粘接层的要求。

3）IPC-M-107：印制电路板材料标准手册。包含对各种增强材料、铜箔、基板和半固化胶片的要求。

4）IPC-4101A：刚性及多层印制电路板用基材规范。涵盖了主要用在电气和电子电路的基材（基板和半固化胶片）的要求。

5）IPC-4562：印制线路用金属箔。包括用在基板和印制电路板制造中的金属箔的术语和要求。

6）IPC-CF-148A：印制电路板用涂树脂金属箔。涵盖对一面涂树脂或树脂复合材料的被用在印制电路板制造的金属箔的要求，包括涂树脂金属箔的工程概要和性能数据的说明，并指明了金属箔的材料种类和树脂种类。

7）IPC-CF-152B：印制电路板复合金属材料规范。包括对用在电子应用领域的铜/因瓦（镍铁）合金/铜（CIC）、铜/钼/铜合金（CMC）及三层复合材料的要求。

8）IPC-TR-482：薄铜箔的新发展。评估现行的和将来的互连产品及电子组装件的质量外观，评价基材、导体的物理性能要求、内层、结构、重合度、镀通孔、元器件安装区、洁净度评估、阻焊层和印制电路板电气性能要求的技术方法和技术应用概要。

9）IPC-TR-484：IPC 铜箔延展性联合研究结果。评估工业铜箔经销商提供的铜箔的延展性测试报告。

10）IPC-TR-485：铜箔断裂强度试验联合研究结果。评估断裂强度试验的报告，作为判定电镀和压延铜箔力学性能的一种手段。

11）IPC-4412：“E”类精纺玻璃纤维层印制电路板技术规范。涵盖对“E”类精纺玻璃纤维的分类和要求。

12）IPC-4130：“E”类玻璃纤维非织布材料规范及性能确定方法。“E”类玻璃纤维非织布材料的术语、定义和要求，包括选择和采购这些材料的规范表。

13）IPC-4110：印制电路板用纤维纸规范及性能确定方法。确定制造印制电路用纤维纸的术语以及对化学和物理性能的要求。

14）IPC-4411-K：聚酰胺非织布规范及性能确定方法。包括聚酰胺纤维非织布增强材料的术语、要求和限定。

第7章　图像转移技术

7.1　什么是图像转移

图像转移主要包括将电路图像从照相底版上转移到覆铜基板或其他任何覆金属基板上。在印制电路板制造过程中，普遍应用的两种图像转移方法是：照相印制法和丝网印制法。

1）照相印制法：这是一种非常精确的制作工艺，通常用于半导体和集成电路的制作，其典型的导线宽度是几微米。尽管通用功能的印制电路板产品不需要如此精确的工艺，然而对于专业应用的印制电路板，则需要 100μm 的导线宽度。照相印制法是一种常用的方法。

2）丝网印制法：尽管没有照相印制法的制作工艺精确，但丝网印制法是一种既便宜又简单的方法。世界上大多数印制电路板的制作都采用丝网印制法。

7.2　基板表面的准备工作

铜箔的表面质量对图像转移过程的成功和生产量起着重要的作用。需要仔细检查铜箔表面的凹点、钻孔焦痕以及其他任何不合要求的地方，如果检查到不能接受的缺陷，图像转移过程应该停止，并应该立即将有缺陷的材料报废。因此，任何类型的印制电路板制作方法在图像转移之前都应对铜箔表面进行清洁处理，以便于可靠运用，这是一个基本的步骤。在印制电路板制造过程中，最常遇见的问题是由于基板表面不清洁引起的。因此，基板应远离油类、油脂、灰尘、手指印和有害微粒。可能的污染源是用来修剪、钻孔、冲切或空气压缩机通风的设备。基板表面的任何污染物都可能削弱感光性树脂的附着力或减小电镀沉积铜的结合力。因此，很好的清洁方法对基板表面的准备工作是必需的。普遍使用的方法是：

1）人工清洁：

①　化学清洗；

②　脱脂（蒸气或水性的物质）。

2）机器清洁。

7.2.1 人工清洁方法

7.2.1.1 化学清洗或冷清洗

化学清洗必须使用浓缩的碱性化学药品去除基板表面的油类、油脂和污物的微粒。使用浓度为80% ~100%的碱性化学药品，在60 ~70℃之间的温度范围内清洗基板，清洗时间是20 ~30min。碱性浸泡之后，应使用过滤后的无油自来水有效的冲洗基板，用水浸洗之后再用强水喷射，以保证完全去除清洁剂。因为曝露的环氧基板或聚酰胺基板经过热碱性溶液的浸泡，所以有时应首选中性的或酸性的清洁剂。

化学清洗步骤如图7-1所示，它们是：

1）使用热浸泡清洁器浸泡除油；
2）水清洗（使用4bar[⊖]或60psi以上的加压水）；
3）喷水；
4）铜箔微蚀（可选择的）；
5）水清洗；
6）检查（是否完全去除油类或油脂）；
7）浸酸（中和）；
8）水清洗。

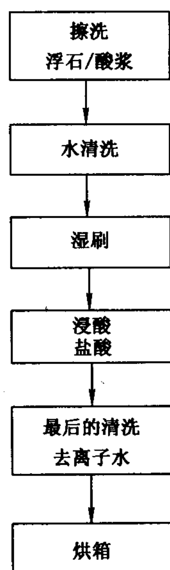


图7-1 简单的人工清洁过程

7.2.1.2 蒸气脱脂

这个过程包括用冷凝的纯净溶剂蒸气清洁基板，使蒸气脱脂剂中不易燃的溶剂，例如氟氯化碳（三氯乙烯或全氯乙烯）达到它的沸点，这种溶剂蒸气能除去基板表面的油脂污染物。图7-2显示了用溶剂除油的清洁过程。第一步使用干净的布轻轻的擦拭，用溶剂浸湿整个印制电路板的表面，这种溶剂是有效的去污剂，并且和它们溶解的材料不发生化学反应；之后是使用浮石或盐溶液擦洗，这个步骤能够除去无机物质，如微粒和氧化物，并有助于一定程度的除油；接下来的步骤是用水清洗印制电路板，然后使用毛刷除去浮石的纤细粒子。所有以上这些步骤，仅在被清洁的印制电路板边缘加以支撑，并且应该尽可能的使用橡胶手套。

为了除去残留的碱和金属氧化物，为图像转移准备洁净的表面，板子应在盐酸（浓度为10%）中浸酸。最后的清洗过程最好使用去离子水完成，使用自来水清洗可能导致由水的杂质引起的故障危险。在清洗过程中最后的步骤是烘

⊖ 1bar = 10^5Pa。——编辑注

干，烘干通常是用压缩空气吹基板表面，压缩空气系统的空气管中应该有一个消除压缩机油脂污染物的过滤器。为了完全烘干，应该保持印制电路板在温度为 90℃ 的烘箱中放置大约 15min。

溶剂蒸气是有毒的，甚至是众所周知的空气污染物。因此，当操作中使用溶剂蒸气时，必须注意不要吸进蒸气，应该确保充足的空气流通，使蒸气浓度最大不超过 $100\times10^{-4}\%$。

除油也可以使用清洗溶液浸泡，通过有机污染物和溶液起化学反应实现。它十分有效的除去了油类和油脂，并且不会造成任何严重空气污染。

蒸气脱脂始终用纯溶剂清洗基板，是对冷溶剂清洗过程的一个改进。把除油部分加热到油脂溶剂的沸点，因此基板的烘干比冷溶剂清洗基板的速度快。蒸气脱脂设备也可使用超声搅动系统，超声搅动系统的搅动是通过声波来完成的。

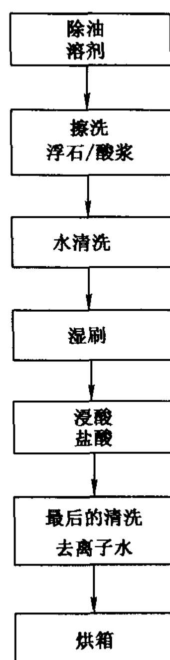


图 7-2　使用溶剂脱脂的人工清洁法

7.2.2　机器清洁

在机器清洁过程中，典型的是通过研磨刷清洁机用研磨剂，例如金刚砂、刚玉、氧化铝和碳化硅清洁基板。这些研磨剂材料可以浸入到尼龙或类似塑料物质中，因而所用的毛刷结构是扁平的薄片形或者是细丝形。在干膜抗蚀剂成层之前，通常使用 320 个网格的碳化硅细丝研磨刷清洁铜箔表面。不同类型的机器清洁操作如下：

1）抛光；

2）刷光；

3）磨光或砂纸打磨；

4）去毛刺或擦洗；

5）擦洗。

1. 抛光

这个过程是通过使金属表面光滑来改进它的外观。通常使用抛光轮（棉布）进行抛光。

2. 刷光

这个过程是使用旋转的非金属丝刷，例如尼龙刷使金属光滑，丝刷通常是润湿的。对于非常暗淡的金属表面，使用 3F 级或 4F 级的浮石粉水浆进行刷光。尽管这样能够很好地除去微粒物质，也能清洁掉重氧化物或其他金属污染物，但不能完全的移除有机污染物，例如油类和油脂。实际上，这些污染物保持在

刷子中，因此，在刷光之前建议使用溶剂除油。对于大量镀通孔印制电路板，典型的使用研磨刷清洁的过程框图如图 7-3 所示。

3. 磨光或砂纸打磨

磨光指使用棉布轮擦亮金属表面，从低光泽产品变为高光泽产品。这种方法除去了大量的无机污染物和颗粒物质，也有助于去除钻孔周围的焦痕。磨光能使用电动手持振动器完成。

4. 除去毛刺

板子钻孔或冲孔之后，需要注意毛刺，毛刺是钻孔穿过印制电路板时产生的多余的金属凸出物。即使使用最好的钻尖和钻孔设备，都会不可能避免形成一定数量的毛刺，特别是在钻尖从基材中出来的地方更是如此。为了制作可靠的镀通孔，这些毛刺必须被彻底的去除，通常使用研磨剂清洗来完成。去除毛刺的机器由去毛刺轮（熔化的碳化硅）组成，用于除去被钻基板上的毛刺，这个过程仅在湿式制程中应用。砂纸打磨过程（湿去毛刺）包括 280 ~ 600 栅格的防水研磨剂。

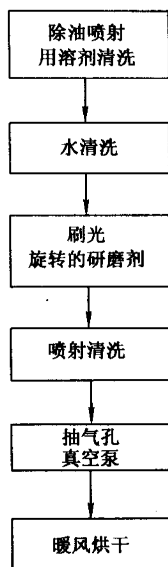


图 7-3 使用研磨刷清洁大量镀通孔印制电路板的过程

在以上所有的方法中，基板清洁后，在高压（ > 60psi）下用水冲洗，并用热吹风吹干。通常，所有的机械过程使用自动的或半自动的机器。在这些过程期间，基材可能被降级，换句话说，就是降低了板子的电性能，因此需要严格的过程监控。

5. 擦洗

洗擦使用由细塑料毛刷构成的快速旋转式毛刷完成，毛刷不断的用研磨剂浸湿。把浮石粉加入水中形成研磨剂，研磨剂一般可再循环使用。这种方法包括最后的循环水刷洗，以确保颗粒物质全部移除。擦洗机器为印制电路板表面提供了极好的表面抛光。

7.2.3 清洁度的测试

为了验证清洁是否充分，可以使用在线的水膜破裂测试。铜表面的清洁度可用接触角和可湿性表示。

1）接触角：洁净的铜表面应该有非常小的接触角；

2）可湿性：干净的铜表面应该保持一个连续的干净水膜 15 ~ 30s。在测试期间，水膜不应该破裂为水滴，也不应有未湿的区域。如果水膜破裂，则说明清洁不够充分。

7.3 丝网印制

用丝网印制技术将照片图像转移到覆铜基板上，这种技术在印制布、印制板等领域已经应用了很长时间，并且当应用于印制电路板制造业时，达到了最高的精确等级。这种技术特别适合于最终的分辨率和精确度要求不是很严格的低成本的印制、蚀刻和电镀印制电路板。

丝网由铝制框架、网丝、感光胶和粘结剂组成，在需要沉积铜的地方将感光胶用光化学过程去除。板子焊盘位置的开口区域一般是 1:1 的比例规格，±10% 的变化是不常见的。感光胶的弹性对于印制电路板来说形成了很好的衬垫，并且有助于提高印制清晰度。

模板印制是最基本的操作，使用电路设计的模板图像将抗蚀剂转移到覆铜基板表面上。模板稳定的附着在丝绸、尼龙或不锈钢丝网表面。刮刀划过丝网表面，液体抗蚀剂材料在刮刀的压力下被迫通过没有模板保护的网孔的开口区域，进入到覆铜基板的表面，刮刀的压力使丝网向下与基板接触。当刮刀通过给出的点时，丝网织布张力突然使后面的丝网断裂，而将油墨留下。图 7-4 说明了丝网印制的过程。

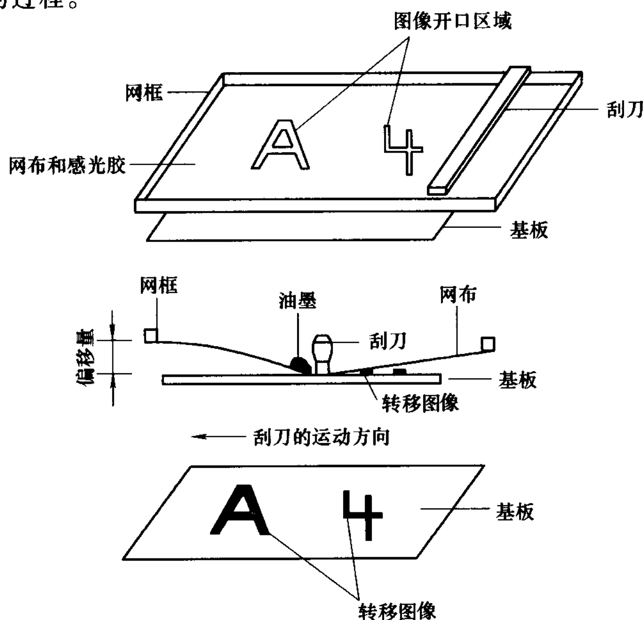


图 7-4 丝网印制的过程（NTTF 注释）[⊖]

⊖ NTTF：NTTF 电子学中心，班加罗尔，印度。

7.3.1 网框

网框为网布提供了一个支撑，使网布具有均匀一致的网丝或网孔，并可以伸展。通常使用的平面网框有两种类型：“刚性类型”和具有不固定框架的“可调整的类型”。如图 7-5 所示。

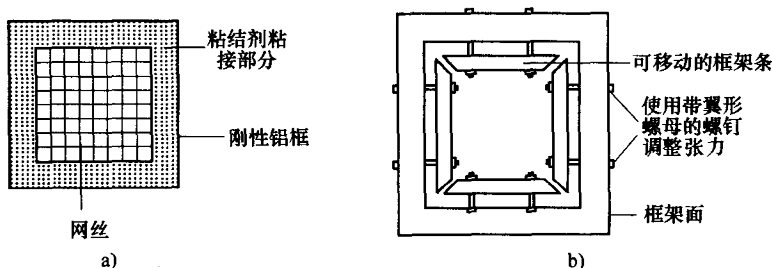


图 7-5 丝网印制网框的类型

a) 刚性类型 b) 具有不固定框架的可调整的类型

框架由坚固的材料制成，如木头、铝合金、不锈钢或塑料。在印制电路板工业中，铝合金和不锈钢框是应用最广泛的框。虽然木头框的重量比较轻，但由于它具有吸水性，在制作过程中会导致弯曲，一般不被使用。通常，刚性类型的网框使用铝合金材料，可调整（可改变）类型的网框使用不锈钢制作，网框的尺寸一般是 400m×400m，然而，可利用的丝网面积仅有 10%～25%。

7.3.2 网布

在丝网印制中使用的编织网丝可以由不锈钢、丝绸、聚酯、尼龙或类似的材料组成。

编织网丝的细线可分成下列两种类型：

1）单丝：单丝布使用单股纤维线编织而成，例如不锈钢、磷青铜、尼龙和聚酯布。

2）多丝：多丝布使用一根以上的纤维或许多分离的纤维编织而成，例如丝绸或聚酯布。

网布根据网目数、网孔开口区域、网孔区域或油墨覆盖区域的百分比分类，网孔根据每直线厘米的线中细线或金属线（开口处）的数量或金属丝的直径进行分类。编织类型、单丝-多丝和网孔类型是需要考虑的重要因素。网孔的分类号越大，每直线厘米中的金属线越多，因此网孔越小，电路的排列行数越精细。然而，将油墨通过小的网孔压入基板表面有时更为困难。

多丝聚脂主要用于陶瓷印制，而在电路印制中不使用。在电路印制中通常使用单丝如聚脂和不锈钢，因为它为油墨更好的渗入沉积物提供了更多的通路，

并且涂覆均匀、色调一致。在挤压过程期间，它产生的摩擦力很小，因此单丝可采用直接的感光胶和间接的感光胶的丝网印制方法。

单丝聚脂布的筛号范围为 100 ~ 140 网丝/cm。然而，在最大精度的应用中，例如要求重合度的误差小于 0.1mm 时，建议使用不锈钢布，以达到最好的效果，不锈钢布筛号的选择范围为 120 ~ 140 网丝/cm。为了防止堵塞，最大粒子尺寸应该不大于网孔的 1/3。例如，一个网号为 80 的网布，其网孔大约为 224μm，所以粒子尺寸不应超过 75μm。丝网越好，沉积物越薄。使用一个 180 的网孔和细粉末糊可以得到 100 ~ 150μm 厚的沉积物，选择的网布筛号为 80。

墨层厚度通常由织布材料控制。为了确定恰当的织布网目数，可使用理论色彩饱和度。在印制工作期间，理论色彩饱和度是指在刮刀经过之前织布上油墨的数量，它由细线数量、细线的稠密度和网孔的大小决定（见图 7-6）。

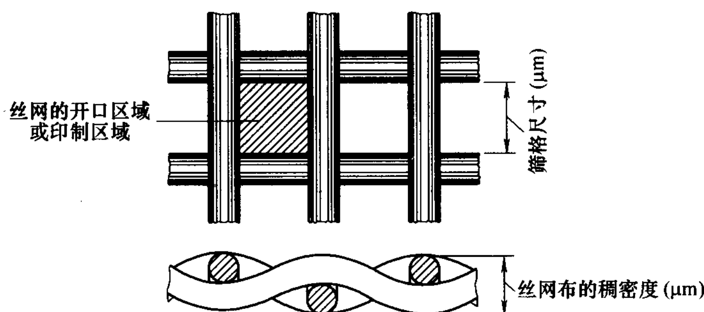


图 7-6　丝网布的几何尺寸

丝网印制得到的图像边缘清晰度因丝线的稠密度（d）和网孔宽度（M_o）的不同而不同。所用的细线类型（HD、T、S）不同，得到的网布也不同。在印制电路板工业中，丝网印制最常使用的细线类型是 T 型和 S 型，如图 7-7 所示。

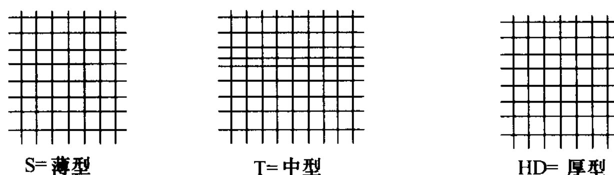


图 7-7　S、T 和 HD 网丝类型

7.3.3　丝网的准备

丝网的准备需要考虑各种因素，例如图像转移线间距的要求、板子的尺寸、制作过程、周期长度等。然后选择适当的网布类型、网孔尺寸、网框模板和油墨。一旦这一切准备就绪，网布被裁切至比网框模板稍大几厘米，并装入用钉

子和粘结剂构成的网框中，用手使其达到最大且均匀的张力。

在电路印制的过程中，合适的绷网是非常重要的。张力过低将会使印制不清晰，颜色、图形效果较差，非接触印制、网孔宽度减少和油墨通道减小。绷网时，细线应与网框一侧平行或成45°的角，且网框应是刚性的，在绷网期间，其侧面不应弯曲。丝网的张力应维持在10～15N/cm（牛顿/厘米）。

在网框上可按照以下方法进行绷网：

1）在网框上使用专门的钉子或粘结剂，可使拉伸的网布不变形。这样，张力不可调。绷网时，可使用具有气动夹具的气动绷网设备（使用空气压力）。

2）使用移动的杆架也能进行绷网。在这种情况下，丝网的张力可调。

一旦完成了绷网，便可使用张力计测量丝网的张力。张力计可放置在丝网的任何部位，而后张力计的读数盘就有数据指示了。张力计测量的张力范围为7～50，校准的刻度盘单位是N/cm。

然后，移走绷网框架，彻底的清洗网布，并使用去脂剂除脂。去脂剂不应对网布有影响，它可以是20%的氢氧化钠或磷酸氢二钠或是由丝网厂商推荐的其他任何去脂溶液。

丝网去脂后，使用热水或冷水进行冲洗，然后使用风扇或吹风机的热气烘干丝网，之后丝网就可以去印制了。

7.3.4　刮刀

在丝网印制过程中，使用的刮刀由人造橡胶材料制成，例如氨基钾酸酯或橡胶条，它们被安装在木制或铝制的支架上（见图7-8a）。这种材料的厚度多种多样，且由不同的天然和人造（聚氨酯）橡胶组成。使用硬度计（硬度）可测量橡胶弹性，通常：

1）在纺织工业印制中，使用的橡胶硬度为40～50；

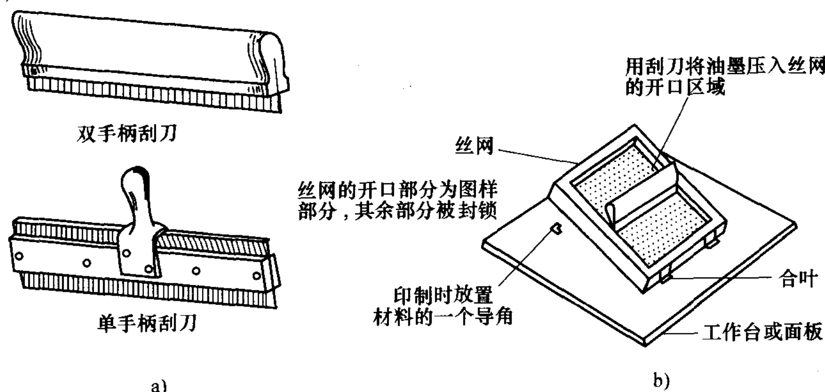


图7-8　刮刀的类型和刮刀的使用

a）刮刀的类型　b）刮刀的使用

2）在印制电路板印制过程中，使用的橡胶硬度为 70 ~ 80。

刮刀的锐度对于印制来说非常重要。划线光洁度、一致的墨层厚度和边缘精确度取决于刮刀的锐度。连续操作后，边缘变钝，其锐度就会减小，必须使用沙纸或其他研磨材料保持其锐度，但是过于锐利也会损伤丝网。图 7-8b 为刮刀的使用。

7.4　图样转移技术

7.4.1　丝网模板法

在这种方法中，照相感光胶直接覆盖在丝网上，且暴露于光线下，从而和胶片原图直接接触。当丝网显影时，图形区域的网孔打开。在处理过程中，使用的聚乙烯醇、聚醋酸乙烯酯或聚氯乙烯照相感光胶中溶入的一些颜料使图形显示出来。

感光胶并不处于光敏状态。为了使其具有感光性，在使用前，感光胶需要与感光剂混合。使用的感光剂是重铬酸钾、重铬酸铵或重铬酸铵钠。

将涂有敏化感光胶的丝网暴露于紫外线或其他荧光源下，其曝光时间取决于光强度和灯泡与丝网之间的距离。通常灯泡与丝网之间的距离是 1.5ft。

在曝光过程中，正片或负片被放置在涂有感光胶的丝网印制面上。曝光使得曝光区域产生聚合作用，这使感光胶不能溶解在显影剂中。如果在照相板和丝网之间出现气隙，必须使用真空系统将其排除。气隙可能引起图形结构的不完整和半色调丝网印制的不足。真空印制使线路、半色调丝网印制和无针孔更清晰。有光源的真空印制机和所有其他的调节设备可在市场上得到，感光胶的供应商也详细说明了准确的曝光时间。

曝光之后立即显影，并需要将有感光胶的丝网面朝上。使用充足的热水或冷水冲洗丝网，直到打开图形区域的网孔，这样就可以看到详细而清晰的图形了。然后使用冷空气或最高温度为 40℃ 的热空气使丝网干燥。最后，彻底检查丝网，并为印制作好准备。

直接法提供了具有高尺寸精度且非常耐用的丝网模板，然而最详细的资料不能得到复制。在冲洗丝网模板时可能产生多孔，多孔是由于涂层薄、曝光时间太短、感光胶老化、显影时间太长或不适当的光敏处理造成的。

7.4.2　间接法（转移型丝网印制法）

这种方法使用了在衬背板上独立的丝网印制薄膜。将制版软片在此膜片上曝光，然后用显影剂溶解膜片上未曝光的区域，而将曝光的区域留在衬背板上。

随后，衬背板上的膜片在丝网织布上被加压并粘接。最后，将衬背板剥离。膜片图形没有覆盖的所有网孔打开，因而具有照相丝网印制膜片的丝网就准备好了。这就是众所周知的间接法或转移型丝网印制法，这个过程只能在有低亮度的黄光、橙光或红光的房间内完成。

感光胶可用作非敏化或预敏化产品。非敏化感光胶很容易与适当数量的感光剂混合，并从最初的容器中直接放置到网布上。预敏化感光胶消除了可能的混合误差，还节省了工作时间，并在规定的存储时间内销售。在典型的转移型丝网印制法中，商业上应用的膜片有：① Chromoline 膜片；②五星膜片；③毛细感光膜片。

感光胶容器必需保存在湿度可控、低亮度的环境中，而且密闭性要好，然而耐储时间却受到了严重的影响。

当使用手工制造少量的印制电路板时，间接法更合适。这种方法速度快，但尺寸的准确性低，丝网模板的耐用性差，且更容易受到机械损害和印制过程中断的影响。

这种方法仅能在有黄光的房间对膜片进行处理。膜片不应弯曲，因为这样会影响丝网的粘合，一定要避免膜片受潮。

7.4.3　切割膜或手刻膜的处理

在电子电路印制中，手工准备的丝网通常是切割膜类型，它们由透明的或半透明的膜片涂布组成。切割膜上的感光胶时可使用涂覆的方法，也可使用粘结剂或静电方法将其半永久地粘接在透明的或半透明的塑料或纸制衬背板上。膜片可以是溶漆型也可以是溶水型，溶水的膜片能被软化或溶解，或用水、水和酒精的混合物粘接，或用膜片制造商推荐的胶着液体粘接。印制丝网使用的膜片或涂层应不能溶解在油墨、油墨中用的溶剂或印制中使用的抗蚀剂中。水溶性膜片应不溶于所有类型的油墨，但水基油墨除外。印制油墨，例如乙烯基、喷漆、环氧树脂和油类展色剂油墨适合于印制。喷漆膜片不溶于所有的油墨，漆基油墨除外。

切割膜不但颜色不同，其厚度也可各不相同。切割膜能被粘附到如金属、尼龙、聚酯和丝绸等丝网织布上。切割膜电路印制的准备工作与普通的丝网印制相似，且使用的膜片也相似。

7.4.4　照相工艺

在电子电路印制中，使用最普遍、也是最实用的方法是塑料衬背板。这种衬背板保持了图形，并且对大气环境的影响最小，特别是对较大的丝网，能更好的消除膜片的收缩或膨胀。

使用合适的粘接液体能把切割膜粘接到丝网织布上。膜片的类型不同，使用的粘接液体也各不相同。但单独的水能用于粘接溶水性膜片，建议使用 3∶1 的水和酒精混合剂粘接一些可溶的膜片。当把膜片粘接到织布上时，最好在膜片上放置增层，以便和织布更好地接触，增层可以是玻璃或纸板。

膜片放置在网布上后，在网框边放置一些重物使其受到压制。使用一块布或刮刀处理胶着液体。如果使用布，需小心不应浸透布。覆盖在膜片上的网布顶部一次仅应润湿 $9in^2$，然后立即使用干布擦干润湿的区域。不允许织布上的胶着液体保留太长时间。膜片干燥 10 ~ 15min 后，可将湿布剥落。此时，图形转移过程中使用的丝网就准备好了，如图 7-9 所示。

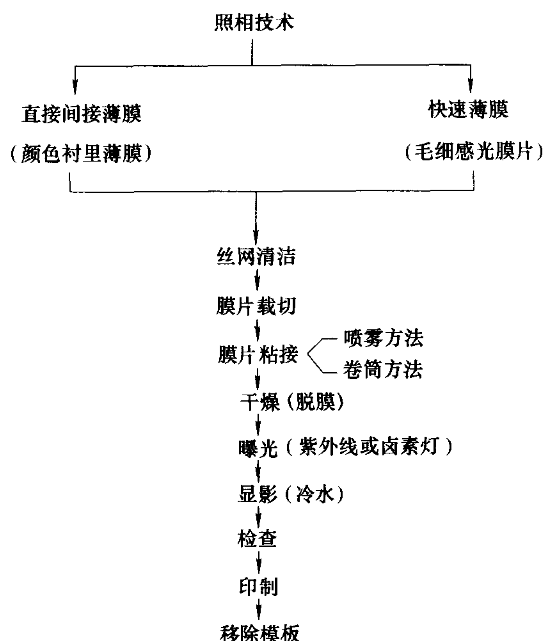


图 7-9　图形转移中照相工艺的流程图

7.5　印制油墨

丝网印制油墨能够使用化学药品或固化方法去除。

它们可以分成以下几类：

1）使用碱或可除抗蚀剂（光刻胶）的溶剂；

2）热处理法、紫外线处理法或风干处理法。

在丝网印制过程中，蚀刻和电镀抗蚀剂使用的油墨通常是乙烯基物质，从广义上可分成两类：①溶剂可溶性油墨；②碱溶性油墨。

1）溶剂可溶性抗蚀剂：由于在酸性和碱性条件下，它们都有很强的抗化学药品侵蚀性，所以使用三氯乙烯或三氯乙烷溶剂进行脱膜。

2）碱溶性抗蚀剂：由于它们是酸性抗蚀剂，所以采用碱性溶液，使用浓度为2.5%的氢氧化钠溶液在30~40℃的温度下进行脱膜。

印制油墨包括颜料和展色剂。展色剂是粘结剂和溶剂的混合物。基本的粘结剂有乙烯树脂、酚醛树脂、乙基纤维素喷漆、硝酸纤维喷漆，亚麻子油、棉籽油、蓖麻油或商业上指定应用的粘结剂。粘结剂的作用是把油墨永久的粘接在基板表面上。溶剂有酮、丙酮、酒精、芳香族溶剂、含氯溶剂和商业上指定应用的溶剂。

油墨的选择取决于许多因素。油墨在印制电路板上应该迅速变干，而在丝网上应该是缓慢变干。它对所有的化学制剂应具有很强的抗化学性，但容易被剥离。它应是很容易看见的，但同时又不污染清洁器。油墨的最终选择应综合考虑以上提及的所有因素。

7.5.1 紫外线固化油墨处理

紫外线固化油墨的处理通常在有输送设备的仪器中进行，在高强度水银蒸气灯下进行曝光。它是一种单面系统，如果另一面图像需要处理，则在第一面被处理之后处理第二面。

紫外线（UV）固化油墨由三种主要的成分组成：① 光敏单体、聚合体或光起始剂；② 保护胶体；③ 颜料和染料。

油墨中的光起始剂吸收紫外线的能量，并引起聚合作用。光起始剂能够保持油墨稳定，并在实际使用之前保持在容器中，以防混合物发生聚合。油墨的固化取决于其化学成分、颜料或填充材料的类型和数量、使用涂层的厚度和紫外线的能量。

紫外线固化油墨是100%的固体物质，它能够提供快速的处理和较高的生产力。然而，获得不同批次的一致性有一定难度。如果固化过度，粘接在铜箔上时可能变得易碎。当湿膜厚度增加时，固化也是十分困难的。

7.6 印制过程

底板上电路图形的丝网印制有两种方法：① 手工丝网印制；② 自动或半自动丝网印制。

7.6.1 手工丝网印制

手工丝网印制过程是在牢固的工作台上进行的。网板被固定在用较高的机

械支撑的框架上。使用的刮刀宽度需要超过图形宽度 2～4cm，刮刀的速度和压力通过手工控制，操作者的技术决定了印制的质量。这种类型的印制用于低成本、非专业板子的制作。

7.6.2 自动或半自动丝网印制

在自动丝网印制技术中，使用液压控制刮刀的机器具有恒定的速度，使用气动控制的刮刀具有恒定的压力。刮刀恒定的速度和压力使自动印制比手工印制更加均匀一致。通常，多基板所有内层的印制都使用这种方法。

丝网印制机器的设计和操作方面的改进使得手动机器的使用逐渐减少。如今的半自动和全自动机器具有自动进料、上架和传输处理装置，工作效率极高。标准尺寸的板子，0.25～0.4mm 的线宽、间距和长时间的操作，最适合使用机器印制。然而，由于专业人员能够通过他们的技术调节油墨粘性、湿度、丝网张力和基板的情况，所以较高分辨率的丝网印制只能通过手工方法获得，但是对于大部分印制电路板的制作来说手工操作太慢。

7.7 照相印制

基本的印制电路板的照相印制使用了能形成连续胶片的感光材料，感光材料对日光或其他的光线非常灵敏，所以能进一步处理胶片的曝光（未曝光）区域，而不影响未曝光的（或曝光的）区域。这种感光材料被称为“光致抗蚀剂”。光致抗蚀剂的基本性能是正确的曝光一定能产生一种变化，在后序的操作中这种变化能清晰的分辨曝光的和未曝光的区域。通常，在所有的光致抗蚀剂中，在溶液中的光诱导变化是其基本的操作。

光致抗蚀剂对 200～500nm 波长的紫外光非常敏感。像照相底版胶片，光致抗蚀剂的安全的可见光区域为黄色到红色波长（560～700nm）之间。如图 7-10 所示。

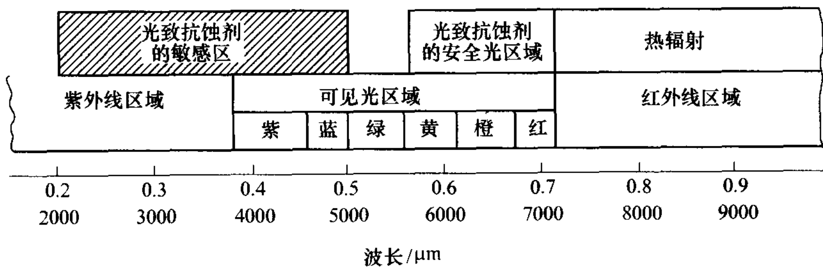


图 7-10　光谱和光致蚀刻剂的敏感区域

光致抗蚀剂可分为湿膜（液态膜）抗蚀剂和干膜（固体膜）抗蚀剂，无论使用湿膜抗蚀剂还是干膜抗蚀剂，照相印制技术的图像转移都要应用到下面的步骤。通过适当的负片或正片使涂基板在紫外线下曝光，如果板子是双面板，双面都要曝光，以确保双面图形排列的相互匹配，特别是在板子和照相胶片上冲孔的匹配，曝光时间为数十秒到几分钟。然后，抗蚀剂显影，被抗蚀剂覆盖的板子上的铜箔被保留下来。

在使用液态抗蚀剂时，增加了两个步骤。它们是：① 在抗蚀剂中添加染料，以使其在板子上可见；② 在 80～100℃下焙烤抗蚀剂 10min，使抗蚀剂在蚀刻之前硬化。

7.7.1　液态光致抗蚀剂（湿膜抗蚀剂）

湿膜抗蚀剂是有机液体，当它曝光于一定波长的光时，通过化学的方法改变它们在某一溶剂（显影剂）中的溶解度，可使用它们不敏化的（双组件系统）和预先敏化的（单组件系统）形态。在确定湿膜抗蚀剂确切的化学和物理性能时，化学要素、混合比率、残余溶剂或单体标准这些因素都是非常重要的。在基板上涂覆湿膜抗蚀剂应用了下面几种技术，分别是：

1）浸洗：板子被浸到抗蚀剂中，并缓慢的取出来。通常在板子底部的覆膜比在板子顶部的厚。

2）喷雾：通过这种技术可实现厚度较薄的涂层。多种喷雾的使用可能增加涂层厚度。双面喷雾系统可以使用适当的喷雾座涂覆两面，喷雾座还可以继续将板子传送至干燥炉。这个系统由于过喷而浪费材料，所以没有得到普遍的使用。

3）辊涂：辊涂通过专门的两面辊涂设备完成，这种设备直接连接到绘图系统中，无须放下板子。多基板厚度对其是没有影响的，对于大板子表面的辊涂也比较均匀。

4）流动：把抗蚀剂放置在板子上逐渐倾斜，直到抗蚀剂覆盖整个板子为止。这种方法通常用于大面积的板子。

涂覆之后，抗蚀剂通常在 80℃下烘烤几分钟，以使其硬化。

通常，液态光致抗蚀剂很难处理。涂层厚度不均匀，镀通孔有抗蚀剂堵塞，并且很难移除。需要对抗蚀剂图像中的针孔（污垢）进行检查，且经常需要后续的清理。液态光致抗蚀剂可分为如下几类：

1）负性抗蚀剂；

2）正性抗蚀剂。

1. 负性抗蚀剂

曝光之前，在显影剂或溶液中，负性光致抗蚀剂最初（在紫外线曝光之前）

是可溶解的，但是曝光之后，它被聚合并在显影剂中变得不可溶。此时布线图一定是负片的形式。这种类型的抗蚀剂广泛应用于印制电路板的制造中。

2. 正性抗蚀剂

正性光致抗蚀剂的性能和负性光致抗蚀剂是相反的。最初它不能溶解在显影剂中，但是曝光之后，聚合部分在显影剂中变得可溶。此时布线图一定是正片的形式。这种类型抗蚀剂的使用受很大局限。

液态抗蚀剂原本是更易碎的，它们相当薄，如果草率的操作，很容易受损（Gurian 和 Ivory，1995），必须小心叠放，因为任何与工作面的接触都有可能导致表面受损，包括外来的灰尘和纤维的进入。液态抗蚀剂总是需要干净的工作环境，以防止吸引和包含污染物使产品产生缺陷产品污染物。

7.7.2　干膜光致抗蚀剂

干膜光致抗蚀剂广泛应用于印制电路板的制作中，特别是专业级别的印制电路板的生产。1968 年杜邦公司把丝网印制和液体光致抗蚀剂引入到图像转移技术中，这种技术不仅被广泛的接受，而且还彻底改变了有镀通孔的专业级别的印制电路板的制作。增加的厚度、一致性和灵活的应用是干膜光致抗蚀剂的优势所在。如图 7-11 所示，当复合材料由三个不同层组成时，可使用干膜抗蚀剂。感光聚合层的厚度为 17～75μm，以三明治状夹在聚酯薄膜层、聚烯烃薄膜层和其他层面之间。对于一些特殊的应用，印制电路板制造者在选择合适的抗蚀剂薄膜的厚度时，范围比较广泛。当板子通过层合机时，通过加热和压力把照片聚合体加在板子表面，在层压过程中，成层之前移开聚酯薄膜。聚酯保护层（薄膜）作为防止指印和外来物污染的保护层，在曝光的抗蚀剂显影之前，移除此保护层。聚酯和聚烯烃层允许干膜抗蚀剂绕成卷，其封装长度是在 122～305m（400～1000ft）之间。

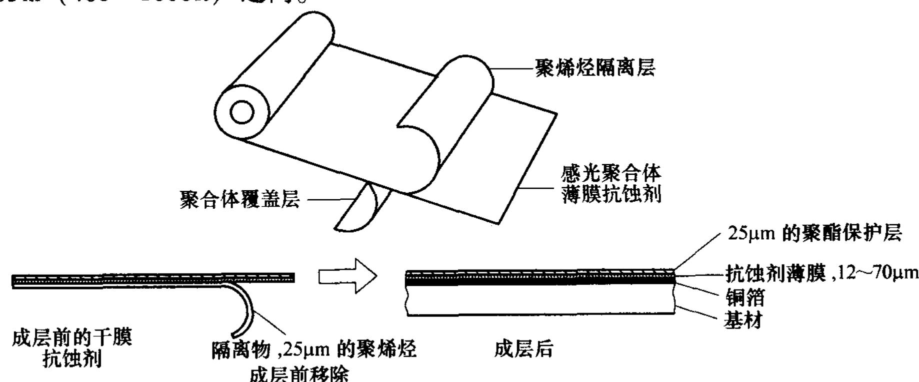


图 7-11　干膜光致抗蚀剂的复合结构

由于干膜抗蚀剂的应用、清洁和处理比较简单，所以应用较广泛。当产品性能的状态下降到 3~4mil（75~100μm）以下（Gurian 和 Ivory，1995）时，干膜抗蚀剂的技术分辨能力接近 1mil（25μm）。

7.7.2.1 干膜抗蚀剂的处理

图 7-12 显示了使用干膜抗蚀剂进行图像转移的典型工艺流程。基板表面的干膜可以是单面类型或双面类型，为了消除表面的污染物，需要对基板的表面进行适当的清洗，从而确保了薄膜与基板良好的粘接，从而使得干膜抗蚀剂的化学性能更为可靠。

以下是干膜抗蚀剂处理的流程：

1）成层前的预清洗和干燥（预烘干）；

2）干膜压合；

3）曝光（印制）；

4）显影和烘干（后烘干）；

5）检测和修补；

6）脱膜。

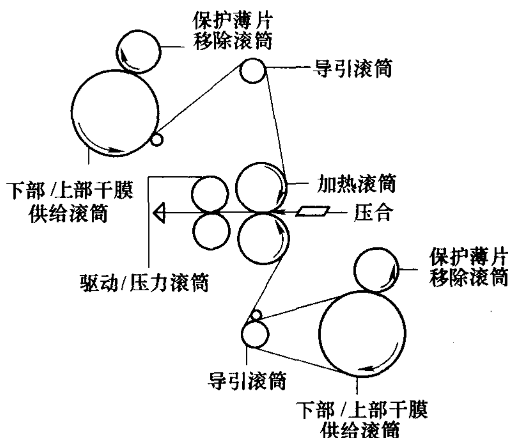


图 7-12 使用干膜抗蚀剂进行图像转移的典型工艺流程

1. 预清洗（表面处理）

可使用早期讨论的表面处理技术中的任何一种方法对基板表面进行清洗。在粘接着干膜的表面，走线受油类和油脂的污染比使用湿膜更严重，因为这样的缺陷不能立即发现。同样的，过度伸展等表面缺陷也是有害的。

在表面清洗过程中，无论基板表面被钻孔还是没被钻孔，都将吸收水分或湿气。为了去除吸收的湿气，可使其放置在 110±5℃的烤箱中烘烤 15~20min。

在用烤箱烘干之前，必须彻底的移除或吹走表面和过孔中水分。此时，应该使用高容量空气蜗轮干燥机，这个过程被称为预烘干过程。干燥时间随基材等级的不同而变化，处理过的基板应贮存在干净的、没有被腐蚀的环境中。

2. 干膜压合

压合是在层合机中完成的，层合机有热橡胶滚筒和机械或气动压力设备。在清洗且干燥后的基板上，使用热的滚筒层合机涂覆干膜光致抗蚀剂，滚筒被预热到 120℃，并且在高压下完成压合（15~40psi 或 100~275kPa），如图 7-13 所示。在加热之前，隔离层自动移除。典型的涂层速度大约是 1.5m/min。不同层合机的温度和压力不同，要根据干膜光致抗蚀剂制造者推荐设定。压合之后，用切刀把板子和连续的干膜分离开。

顶部熏气箱和加热表面之间的距离称为自由空间，它们必须达到所要求的标准。在抗蚀薄膜和基板表面之间很小的自由空间内会导致内部气泡的产生，内部气泡能引起电镀时金属破碎或蚀刻时的侧蚀。

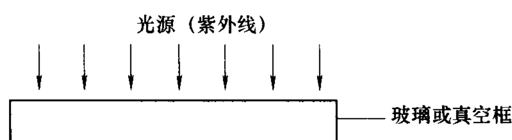


图 7-13　压合过程

双面板需同时压合板子的两面。单面板的压合可通过背对背的放置两块板子，或移动具有干膜抗蚀剂的滚筒，以保持钻孔的绝对清洁。

为了得到最佳结果，应小心的控制压合和曝光之间的持续时间。压合以后的干膜光致抗蚀剂应冷却 10～15min，以得到较好的尺寸稳定性。

如果没有冷却，光致抗蚀剂就会被曝光，从而导致其尺寸性能改变，使电路图像的分辨率变化。

3. 曝光（印制）

使用干膜抗蚀剂时，完成图像转移的最普遍的曝光装置产生紫外线，其波长大约为365nm。因此，尽管也可以使用弓形炭灯和荧光管，但是还是建议使用水银蒸气灯作为光源。在生产过程中，使用一排高压水银灯，提供6000W 的能量，这样的排列能提供光的强度。对紫外光的校准有助于提高板子的产量和可靠的图像转移。对于实验室，一个非常小的系统就足够使用了。

为布线图/敏化感光底层提供照明的光源或紫外光的平行度最终确定图像转移的保真度，并解决其最小尺寸性能。另外，一致的光线确保了从一个点到另一个点曝光的连贯性，以及显影图像中走线宽度的一致。从一致的观点看，理想的光源应该是等方性的发射器，发射器的发射面积要和成像的感光底片一样大或比它还大。印制电路板产品使用的任何光源都必须使上面两个因素和价格达到平衡。

将聚酯薄片和照相胶片（如重氮基胶片或卤化银胶片）的感光胶面对准实现曝光，然后这两种薄膜被放置在真空结构中进行表面间的密切接触。光强度、温度、感光性树脂的厚度和使用的设备类型（见图 7-14）决定适当的曝光时间。确定必需的曝光时间、保持时间、合适的显影条件，以完成试验产品。必需的曝光程度随着胶片的类型而变化，感光性树脂制造商通常同时提供与其匹配的数据。

紫外线灯或水银蒸气灯的选择对均匀的曝光有着重要的影响。老化的灯将影响感光性树脂的聚合程度，而使用阶段式方法会使曝光得到最好的控制。

涂覆在基板上的抗蚀剂曝光之后，经过一定的时间发生聚合作用，达到平衡或稳定状态。同时在聚合体厂商生产数据单的表中指定允许的最小和最大时间。

4. 显影和烘干

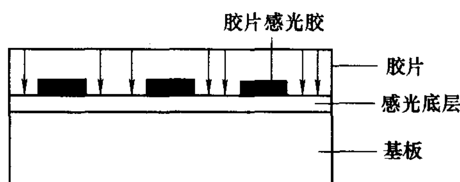


图 7-14 光致抗蚀剂的曝光

曝光的基板稳定后开始显影，首先是剥离聚酯保护层。显影过程中，应冲洗掉未曝光的或非聚合的感光性树脂，而不影响胶片上曝光的聚合树脂。

显影时间由显影剂溶液的温度、化学性质和感光性树脂的厚度确定。在开始显影之前，必须要维持建议的化学药品和温度。如果不进行控制，显影剂就会影响抗蚀剂的聚合，导致胶片表面和侧壁的损坏。

为了确保优良的蚀刻和电镀，必须彻底移除（显影）表面未曝光的抗蚀剂。成层和显影之间的整个时间最多不应超过 8h，以使显影过程中的问题最小化。

通常建议使用的化学药品是 0.8% ~1.2% 的无水碳酸钠（99% 的纯碱）的水溶液。如果使用其他等级的碳酸钠，必需调节使用量以避免在水中产生结晶。

在喷雾显影机中，显影水溶液容易起泡沫，通常使用消泡剂控制水沫。毫无疑问，消泡剂须要以适当的比例加入，以确保不影响聚合体。通常用丁基卡必醇或辛烯来控制泡沫，同时也加快了显影速度。

显影之后的烘烤或烘干应在 85 ~95℃ 下持续 10 ~15min。一定要彻底清除在显影和清洗期间由抗蚀剂和基板吸收的湿气，因为这在相当大的程度上，也有助于图形镀层的粘着。通过烘干，耐化学性也得到了提高。

5. 检测和修补

板子被烘干后应进行检测。检测应测定板子的质量及主要和次要缺陷。有缺陷的板子应被脱膜，并且重复整个制作过程。

像小针孔缺陷和各种其他次要的缺陷可通过涂覆一些清漆加以修正，这些清漆涂层不能影响后续的处理。

6. 脱膜

电镀/蚀刻后若发现板子有缺陷，应使用厂商推荐的化学药品为感光性树脂脱膜。使用的化学药品通常是 20% ~30% 的无水氢氧化钠的水溶液，清洗槽的温度大约维持在 50 ~60℃。用水清洗板子之后应使用空气过滤机吹干。

感光性树脂干膜抗蚀剂的处理（压合、曝光、显影）区域应该用低亮度的黄光照明，并必须和其他的处理分开进行。

7.7.2.2 优质处理区域的条件

感光性树脂薄膜（湿膜或干膜）是一种照相产品。因此，在无尘空气中进行操作减少了修补或其他重做的可能，且极大地改善了成品板的质量。下面的测量有助于获得优良的质量：

1）处理的区域应分开，并用黄灯照明；

2）操作的区域和设备应进行常规的清洗；

3）建议穿着合适的防护服，例如不起毛的衣服，耐酸碱的鞋、帽子等；

4）应控制照相板生产区域等的温度和湿度；

5）必须从紫外线处理设备中分离出溶解的显影剂。

7.8　激光直接成像（LDI）

传统的图像转移系统使用了布线图和光绘仪。由于光绘仪进行周期性的校准和常规的维修，因此通常认为其尺寸的精确度是确实可靠的。光绘仪能提供的最好定位准确度是 28μm，并且不受温度和湿度变化的影响。可观测到的误差是在正交失真中引起的各个轴向的线性和非线性误差，其中对角线上的误差最大。

印制电路板制造业使用的布线图由突出的聚酯组成，因此在突起的和交叉突起的方向上有不同的性能。另外，布线图材料的湿度性能大约为 $14\times10^{-4}\%$ RH 时，布线图材料的温度性能大约为 $16\times10^{-4}\%/℃$。

由于冲孔的精确度和可重复性的互相矛盾，使冲孔加工系统产生了更多的误差。在使用期间，一些印制网框温度升高，并产生多达 25μm 的变形。

在内层制造期间，当所有的误差叠加在一起时，平均误差可达到 130μm。当堆叠的层进行粘接时，可能需要 175μm 的设计规则来保证重合度。这就意味着，要想大量的节省制作成本，在所需的大板子上，使用传统的图像技术很难实现高产量 HDI 设计。如果在成像过程中去除布线图，就会明显的消除布线图所引起的误差源。激光直接成像技术的使用提供了无须布线图的制造过程，除去了布线图的制作和使用过程中由环境控制引起的大量误差。激光直接成像系统的使用结果表明，总的平均误差从 130μm 减小到了 120μm。

激光直接成像是不使用照相板的印制电路板的直接成像过程。它使用了激光束等对光致抗蚀剂进行曝光，在板子表面进行扫描，且借助于计算机控制系统控制其开启和关闭。在此过程中使用的激光束都在紫外线频谱范围内，因为紫外线频谱更适合于普通的可见光致抗蚀剂。然而，当系统工作于可见光频谱和红外线频谱时，应使用特殊配置的光致抗蚀剂。

激光直接成像系统最初用于印制电路板制造领域是在 20 世纪 80 年代晚期。这些早期的系统比传统的接触印制慢得多，只是在最近几年才生产出新一代快速的激光直接成像系统，它对使用照相板的接触印制构成了一定的威胁。随着高功率激光器的使用，在工作板上可达到 4W 的能量，并且随着新一代光致抗蚀剂的使用和更快速的计算机数据栅格化，需要的曝光等级为 $8\sim10\text{mJ/cm}^2$。现在，18in×24in 的面板每面的激光直接成像曝光和处理时间可降低至 30s 以下。

激光直接成像系统主要由以下几部分组成（Sallan 和 Wiemers，1999）：

1）激光系统；

2）光学系统；

3）机械系统；

4）数据处理系统。

1. 激光系统

用来作为光源的激光系统由冷水氩离子激光组成，其功率为 1.5W。曝光发生在紫外线区域的 351nm 和 358nm 两个波长之间，因为普通的照相板在此区域的灵敏性最大。曝光的像素直径是 28μm，由于像素内部亮度不同，所以预留了 10μm 的曝光像素直径。

在水平方向，用激光束对抗蚀剂进行曝光的速度是 240m/s。在扫描运动期间，曝光时钟脉冲控制激光束的亮/暗扫描。被曝光的材料与扫描方向的垂直运动在整个表面上形成行图像结构的一行，其曝光栅格是 10μm。当最大的曝光面积为 $340 \times 600\text{mm}^2$ 时，大约需要处理 20 亿像素的数据量。

2. 光学系统

图 7-15 为激光直接成像系统的光学系统。此系统由声光调节器和产生矩形声波激光束的石英组成，它位于激光束的光轴中。进入的激光被衍射，并根据声波的频率改变其方向。而后光束到达射线收集器或光束通道，经过十面多边形偏转镜面完成扫描，每个镜面之间都有一个小于 2″的角误差。每一个镜面的曝光线是 340mm。

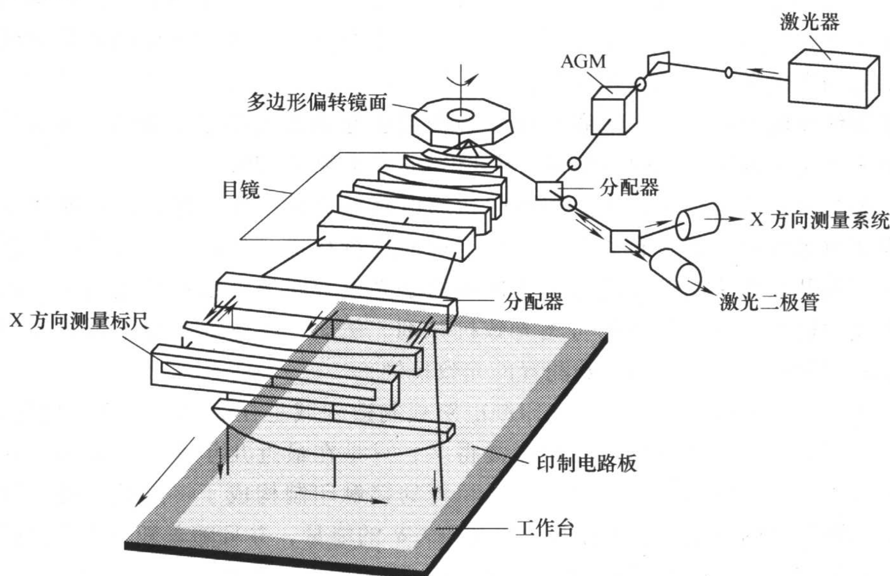


图 7-15　激光直接成像系统的光学系统（经 Sallan 和 Wiemers 同意重绘，1999）

为了获得精确的旋转速度且顺利转动，多边形偏转镜面被放置在 10μm 的空气槽上，并且与工作台同步驱动，工作台随每个新镜面移动 10μm。光学系统由八个透镜组成，以确保遥测光束的路径，从而得到清晰的像素图像。

激光束通过透镜系统后，对激光束进行控制，使其通过半反射镜到达基板抗蚀剂印制电路板或内层基板，而 x 方向测量系统确保了像素的精确位置。这个系统由波长为 685nm 的激光二极管、玻璃测量尺、几个偏转单元、滤波器单元和坐标方格组成。

可以通过控制测量系统的红色激光束，使其平行于曝光系统的蓝色激光束，经过多边形偏转镜面后通过透镜系统，有 50% 的激光束通过镜子到达被蚀刻的 x 方向测量标尺上。图像通过镜子和透镜系统反射回多边形偏转镜面，在坐标方格上被分开，从而完成绘制。

在多边形偏转镜面旋转期间，x 方向测量标尺的图像经过坐标方格，并产生一个光信号，从中能够推知出曝光的时钟脉冲，通过计算曝光的时钟脉冲能确定红色激光束的准确位置。由于红色激光束与蓝色激光束成对出现，所以同时可确定蓝色激光束的位置。

3. 机械系统

在无尘室中，激光直接成像的主要机械组成是 y 轴测量系统、z 轴定位系统、对准和空气通风系统。

工作台直接和 y 轴测量系统连接。由于工作台的运转和多边形偏转镜面是同步的，因此工作台在每个镜面过后都接收到一个定位脉冲，而这个脉冲被加到位于滚珠丝杠上的步进电动机上，且步进电动机也和工作台连接，通过计算相对于参考标记的增量完成定位。

在曝光之前，必须升高印制电路板并对准聚点。工作台使用了三个步进电动机以实现 z 轴定位。这些发动机将工作台升高，直到接近的传感器能够找到印制电路板的铜箔，因此工作台总是位于具有矩形排列的激光束的聚焦区域。

为了使印制电路板能对准，在生产的板子上需要建立两个公共孔，这可使设备能够适当调整图样位置，以完成对图样的钻孔。在板子下面有发光二极管，且在板子上面有四个象限传感器，传感器用来测量每个象限的发光量，且通过 x、y 和 z 轴方向的定位电动机进行调整，使每一个象限获得相同的光强度。

具有光学系统和激光装置的工作台，通过气垫中空气的振动消除了由过往车辆或其他机器引起的震动影响。震动衰减系统保证了适当的曝光质量。

4. 数据处理系统

CAD 或 CAM 数据通常以 Gerber 数据的形式提供给绘图仪。由于兼容性的原因和处理简单化的需要，激光直接成像系统更适合处理这种形式的数据。

图 7-16 说明了典型的数据流传输，通过 ISDN 或 e-mail 接收 CAD 系统的外

部数据。CAM 从调制解调器中读出数据，然后对这些数据进行处理，并使其通过内部局域网（LAN）系统在激光直接成像系统上使用。

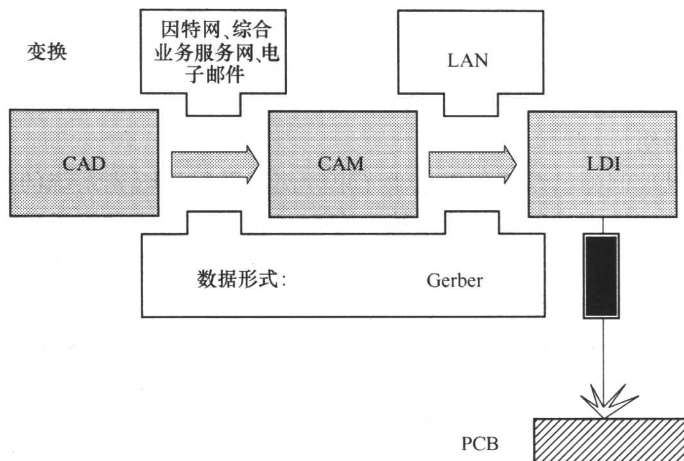


图 7-16　激光直接成像系统中典型的数据流传输

由于 Gerber 形式的数据为矢量，这些矢量与按行表示的行数据不匹配。因此，这些数据必须被转化为 10μm 的栅格像素可用的信息，这就增加了数据的原始数量，需要使用若干同时工作的运算器实时完成数据编辑，一行一行地读取数据，并存储在 250MB 的 RAM 中。RAM 能够存储接近 5 个双面印制电路板的曝光数据。

7.8.1　激光直接成像的优点

通过胶片和激光曝光之间的比较，明显地显示了激光系统在质量、产品公差、及时贮存和价格方面的优点（Barclay 和 Morrell，2001）。从下面任何一个因素中都可以明显地看出其在产品成本方面的优势：

1）无须使用照相板，同时除去了其制造和贮存的成本；

2）减少了印制电路板的印制和制造之间转接工作的时间，使得数据一交给工程部门就可以开始制造，原型生产时间的节省（从胶片的 10h 减少到激光的 3h）是非常重要的；

3）采用灵活的制造路线来满足各种生产需求，且不影响产量；

4）数据一交给工程部门就能开始生产，缩短了产品交货的时间。

同样的，质量的改善具有以下优点；

1）消除了胶片和印制缺陷；

2）在激光成像系统中，消除或减少了使用的受控环境中温度和湿度对产品

的影响。

除了节省费用和质量改进之外，激光直接成像还有许多技术优势，详述如下：

1）分辨率：由于激光光点直径小，所以激光直接成像系统改进了分辨率，很容易就可以达到 50μm 的性能。随着方法的优化，在 40μm 的抗蚀剂中生产 35μm 的精细线已成为可能。将来随着激光直接成像系统进一步改进，可能会实现 25μm 的精细线和间距。

2）对准度：通过消除照相板中经常存在的排列问题，特别是随着温度和湿度的变化照相板各向异性的移动，可改善对准度。激光直接成像系统在板子上能使用电荷耦合器件（CCD）照相系统、基准目标来排列印制图像和面板，也能够使用这些目标位置计算板子或钻孔的移动位置，从而实现了对准度的改进。

3）公差：使用激光直接成像系统实现了质量上的不同公差等级。在理想的情况下，从钻孔图形到传导图形允许的未对准工业标准能从 0.1mm 减小到 0.03mm。

Kelley 和 Jones（2002）阐述了激光直接成像的应用。在印制电路板工业中，激光直接成像系统引起了顺序的结构、后备资源和数据存储设备的根本性变化。激光直接成像系统取代了印制电路板制造业中所有的曝光系统，通常传统的胶片曝光系统和光绘仪所完成的任务也可由激光直接成像系统代替。控制机器完成必需任务的软件很容易设计，且所有的 CAD 系统使用相同的列表工作，每一个印制电路板都有同样的材料规范。将来，激光直接成像系统的使用可能会完全减少电子装配的时间，这既是非常好的又是非常可行的解决方案。Vaucher 和 Jaquet（2002）在激光直接成像和结构上提供了一个更新方案。

7.9　字符印制

字符印制通常是在印制电路板的元器件面上进行的，它给出了元器件的详细资料和在板子上的装配位置。这是通过丝网印制过程使用环氧油墨实现的。一旦完成了印制和固化，油墨和基材的环氧树脂就永久的结合在了一起。字符印制给出的元器件轮廓及标识序号，有助于电路装配，并且在印制电路板重做和解决故障期间，更容易对元器件进行辨认。

在印制电路板的制作中，字符印制通常是最后的程序。字符印制通常使用白色、黑色和黄色。

7.10 几个常用标准

1）IPC-A-311：照相板制作和使用的过程控制。包括照相板制作和使用过程中收集的信息和数据，以提高原图质量，改善了后序的生产质量。

2）PC-D-310C：照相板制作和测量技术导则。包括制造和设计考虑、输入数据要求、测试样品、过程控制、录音和制成原图、切割和剥去原图、矢量光学绘图、激光绘图、直接成像、测量和质量保证。

第8章 电镀工艺

8.1 电镀的需求

在印制电路板上，铜用来互连基板上的元器件，尽管它是形成印制电路板导电路径板面图形的一种良好的导体材料，但如果长时间的暴露在空气中，也很容易由于氧化而失去光泽，由于遭受腐蚀而失去焊接性。因此，必须使用各种技术来保护铜印制线、导通孔和镀通孔，这些技术包括有机涂漆、氧化膜以及电镀技术。

有机涂漆应用起来非常简单，但由于其浓度、成分和固化周期的改变而不适合长期的使用，它甚至还会导致焊接性不可预测的偏差。氧化膜可以保护电路免受侵蚀，但它却不能保持焊接性。电镀或金属涂敷工艺是确保焊接性和保护电路避免侵蚀的标准操作，在单面、双面和多层印制电路板的制造中扮演着重要的角色。特别是在印制线上镀一层具有焊接性的金属已经成为为铜印制线提供焊接性保护层的一种标准操作。

在电子设备中各种模块的互连常常需要使用带有弹簧触头的印制电路板插头座和与其相匹配设计的带有连接触头的印制电路板。这些触头应当具有高度的耐磨性和很低的接触电阻，这就需要在其上镀一层稀有金属，其中最常使用的金属就是金。另外在印制线上还可以使用其他涂敷金属，如镀锡、镀镍，有时还可以在某些印制线区域镀铜。

铜印制线上的另外一种涂层是有机物，通常是一种防焊膜，在那些不需要焊接的地方采用丝网印制技术覆上一层环氧树脂薄膜。这种覆上一层有机保焊剂的工艺不需要电子交换，当电路板浸没在化学镀液中后，一种具有氮耐受性的化合物可以黏附到暴露的金属表面且不会被基板吸收。

电子产品所需要的精密的技术和环境与安全适应性的严格要求促使电镀实践取得了长足的进步，这一点明显的体现在了制造高复杂度、高分辨率的多基板技术中。在电镀中，通过自动化的、计算机控制的电镀设备的开发，进行有机物和金属添加剂化学分析的高复杂度的仪表技术的发展，以及精确控制化学反应过程的技术的出现，电镀技术达到了很高的水平。

使金属增层生长在电路板导线和通孔中有两种标准的方法：线路电镀和全板镀铜，现叙述如下。

1. 线路电镀

该工艺中只在设计有电路图形和通孔的地方接受铜层的生成和蚀刻阻剂金属电镀。在线路电镀过程中，线路和焊垫每一侧增加的宽度与电镀表面增加的厚度大体相当，因此，需要在原始底片上留出余量。

在线路电镀中基本上大多数的铜表面都要进行阻剂遮蔽，只在有线路和焊垫等电路图形的地方进行电镀。由于需要电镀的表面区域减少了，所需要的电源电流容量通常会大大减小，另外，当使用对比反转光敏聚合物干膜电镀阻剂（最常使用的一种类型）时，其负底片可以用相对便宜的激光印制机或绘图笔制作。线路电镀中阳极的耗铜量较少，在蚀刻过程中需要去除的铜也较少，因此降低了电解槽的分析和维护保养费用。该技术的缺点是在进行蚀刻之前电路图形需要镀上锡/铅或一种电泳阻剂材料，在应用焊接阻剂之前再将其除去。这就增加了复杂性，额外增加了一套湿化学溶液处理工艺。

2. 全板镀铜

在该过程中全部的表面区域和钻孔都进行镀铜，在不需要的铜表面倒上一些阻剂，然后镀上蚀刻阻剂金属。即使对一块中等尺寸的印制电路板来讲，这也需要能提供相当大电流的电源，才能够制成一块容易清洗且光滑、明亮的铜表面供后续工序使用。如果没有光电绘图仪，则需要使用负底片来曝光电路图形，使其成为更常见的对比反转干膜光阻剂。对全板镀铜的电路板进行蚀刻，则电路板上所镀的大部分材料将会再次被除去，由于蚀刻剂中铜的载液增加，阳极受到额外腐蚀的负担也大大加剧。图 8-1 给出了脱除过程的印制电路板电镀流程图。

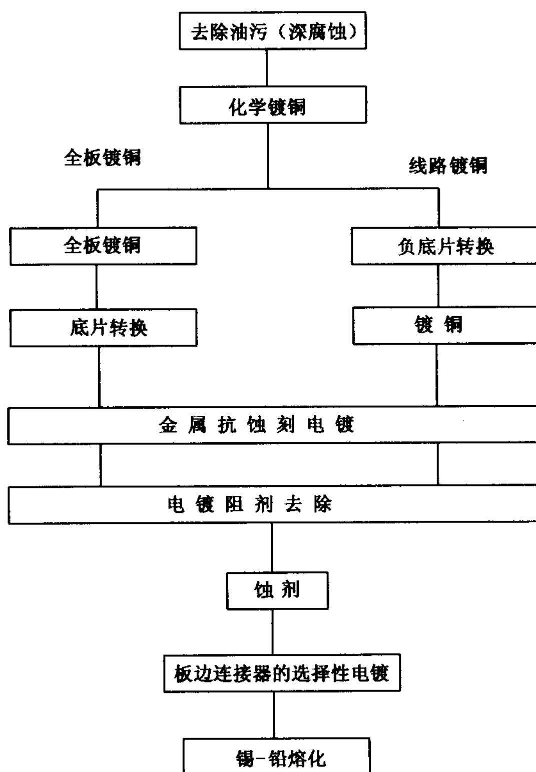


图 8-1 印制电路板电镀流程图

对于印制电路板的制造来讲，线路电镀是一种更好的方法，其标准厚度如下：

1）铜 1mil

2）锡-铅（线路、焊垫、通孔） 0.5mil

3）镍　　　　　　　　　　　　　0.2mil

4）金（连接器顶端）　　　　　　50μm

电镀工艺中之所以保持这样的参数是为了向金属镀层提供高导电性、良好的焊接性、较高的机械强度和能经受元器件终端镶板以及从电路板表面向镀通孔中填铜所需的延展性。

8.2 电镀

电镀就是通过使直流电通过含有可溶性金属盐的电解液而在导体表面沉积一层金属的工艺。

当单向电流流过溶液时会导致带电粒子在溶液中移动，这些粒子称为离子，用来将电流导通到溶液中的终端称为电极，两个电极和溶液形成的组合称为电解电池。另外几个与电镀相关的几个电化学术语如下所示：

1）阳极：氧化作用这类化学反应发生的电极称为阳极，它是带正电荷的电极，在电解过程中，带正电的离子在阳极产生。

2）阴离子：它带有负电荷，在电解过程中，它被吸引到阳极。

3）阴极：发生化学还原反应的电极称为阴极，它是带负电的电极，在电解过程中，带负电的离子在此处产生。

4）阳离子：它带有正电荷，在电解过程中，它被吸引到阴极。

5）电解液：它是一种导电介质，由于离子在其中的运动而形成电流，对电镀来讲，电解液中必须含有用于形成镀层的已溶解的金属盐。

在电解电池中，镀层金属作为阴极，电池的阳极可以是与镀层相同的金属或其他具有良好导电性的金属。发生在电极与电解液交界处的化学反应就称为电解，它伴随着电子的转移。

8.2.1 电镀的基本工艺

必须将要进行电镀的镀层粒子进行彻底的清洁以避免油脂以及杂质，清洁过后的粒子作为电解液的阴极，将电解液放在电解槽中，并使阴极和阳极两个电极浸没在电解液中。

当有直流电通过电解液时，镀层金属的离子集中在阴极的表面并沉积下来。多数电镀液在本质上是相似的，因此，其应用方式以及合成镀层的质量将有赖于相关的加工变量。相应地，沉积有赖于温度、电流强度、金属离子的浓度、pH 值、溶液的运动以及过滤。图 8-2 给出了电镀的基本原理，欲镀金属与阳极相连，欲镀电路板作为阴极。必须控制电镀条件以便在大量的操作变量中保持统一的构成。

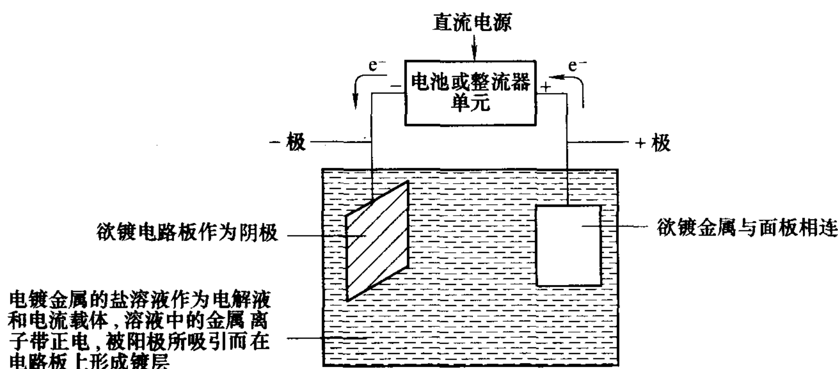


图 8-2　电镀的基本原理

如果组成阳极的金属与阴极上欲镀的金属相同，则电解液的浓度在电解过程中保持不变，虽然沉积在阴极上的金属是从电解液中移出的，但阳极的金属会相称的溶解在电解液中以弥补电解液的损失。如果沉积的和溶解的金属离子不等，则会影响电解液中金属的浓度和沉积速度。

8.2.2　法拉第电解定律

电解的基本原理由法拉第定律规定，详细描述如下。

1. 第一定律

电极（无论是阳极还是阴极）上所产生或吸引的物质的质量与流过溶液的电量成正比

$$M \propto Q \quad Q = It \quad \text{或} \; M \propto It$$

因此　$M = ZIt$

式中，M 表示物质的质量（g）；I 表示电流（A）；Z 表示电化当量；t 表示时间（s）。

2. 第二定律

当相同的电量通过不同的电解液，所沉积的金属的质量与其化学当量成比例

$$M = \frac{ITA}{nF}$$

式中，A 表示原子量（或当量×化合价）；N 表示化合价（参与金属离子还原反应的电子数量）；F 为法拉第常数。

电镀发生在阴极，即带负电的电极，因此阴极表面沉积的厚度与时间及外部电源所加的电压有关。例如，0.5mil（0.0005in）厚的锡铅合金镀层以 17A/ft^2 的值进行电镀需要 15min。

根据法拉第定律，可以推出 1c（A · s）的电量可以沉积 1.118mg 的银，那么 8c 的电量可以沉积 1.118 × 8 = 8.944mg 的银，为了获得这样的沉积量是采用 1A 的电流通电 8s 还是采用 2A 的电流通电 4s 是无关紧要的，只要一定量的电流通电一定的时间产生 8c 的电量即可。

8.2.3　水质

电镀溶液和清洗过程所用的水应当具有较低的杂质含量，如果所使用的水中溶解的矿物离子含量较高，如含有钙、镁、二氧化硅、铁和氯化物等杂质，则会导致铜被氧化、印制通孔中有残留物、剥落、锈蚀、粗糙以及离子污染等。这些问题会导致电路板不合格和设备故障，降低镀槽的寿命并增加洗涤水回收的难度，因此使用硬度低且固体溶解物含量小、水质良好的水势在必行，通常，水中固体溶解物的含量不能超过 5ppm。

溶解固体的多少通常用溶液的导电率来衡量，所用的仪器为电导计，固体溶解物的含量为 5ppm 对应 1μΩ · cm。

为获得纯度如此高的水供电镀和印制电路板制造使用，广泛使用以下两种工艺：反渗透和去离子过程，详细讨论如下。

1. 反渗透

在该过程中，未净化的水在压力的作用下通过一个半渗透膜，这一薄膜具有多孔选择性，它可以过滤掉溶解的盐、有机物和颗粒物质，允许水穿过薄膜。

为了更好的理解这一过程，假设在半渗透膜的两侧分别放上纯水和含盐的溶液，则纯水将会穿过薄膜向另一侧的盐水中扩散使其稀释，这一过程称为渗透作用，这一过程发生时所需的压力称为渗透压。同样，如果压力施加在盐溶液一侧，则此渗透压是反向的，称为“反渗透”。反渗透是水净化的一个有效的方法，它可以去除 90% ~98% 的溶解矿物质和 100% 分子量大于 200 的有机物。

2. 去离子过程

去离子水可以通过离子交换技术获得，这一过程包括将含有溶解离子的水通过一层固态有机树脂，它将离子水转换为 H^+ 和 OH^-。这一过程发生在离子交换柱中，它可以在市场上购买。当需要应用高纯度的水时就需要进行水的去离子这一提纯过程，例如用于组成电解液或电镀过程洗液的水，典型的去离子水有以下几个特征。

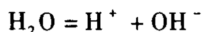
1）溶解的固体残留物（单位为 ppm）	<1
2）20℃时的电导率（单位为 μm/cm）	<1
3）浑浊度	1.0 NTU
4）二氧化硅（SiO_2）含量（单位为 ppm）	0.05
5）25℃时的 pH 值	6.8 ~7.0

6）氯化物含量（单位为 ppm） 2.0

7）有机碳化物总含量（单位为 ppm） 2.0

8.2.4 溶液的 pH 值

纯水中包含有相同浓度的 H^+ 离子和 OH^- 离子。



$$H_2O = H^+ + OH^-$$

水中离子的乘积表示为

$$[H^+][OH^-] = 10^{-14}$$

当向水中加入酸时，H^+ 离子的浓度增加，OH^- 离子的浓度减少，当向水中加入碱时，离子浓度的变化正好相反。溶液的酸性和碱性用其 pH 值来表示，由 H^+ 离子的浓度形成的基本 pH 值刻度范围如图 8-3 所示，H^+ 离子浓度的实际值非常低，为方便起见而采用负对数来表示

$$pH = \log[H^+]^{-1} = -\log[H^+] = 10^{-pH} \quad 或 \quad [H^+] = 10^{-pH}$$

pH 值是电镀工艺控制中最重要的一个参数。

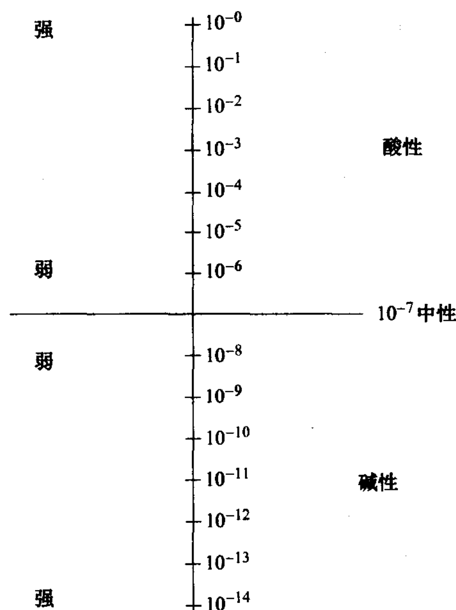


图 8-3 pH 值刻度范围

8.2.5 缓冲剂

当溶液中含有弱酸或弱碱时，其对应的碱或酸就称为缓冲溶液。

缓冲剂只是部分游离于溶液中，将其加入到溶液中是为了减少酸或碱对溶

液 pH 值的附加影响，使溶液的 pH 值保持常数。在电镀中，缓冲剂对电镀工艺参数有重要的影响。

8.2.6 阳极

在电镀中，正电极或阳极在应用中的形式有条杆形、圆盘形、棒状或托盘形，所使用的金属可能与电解液的相同或不同，但其必须具有很高的纯度，阳极受到污染将会影响电镀工艺，因此其纯度应达到 99.9%。阳极的尺寸也非常重要，因为这决定了其承载电流的能力。

8.2.7 阳极罩

阳极罩用来过滤溶解的粒子以保护阳极，它由聚丙烯材料制成，可获得的等级从 1 ~ 10μm 不等。

8.2.8 电镀的预处理

印制电路板电镀中铜金属表面的良好清洗和预处理是必不可少的，铜金属的许多焊接故障就是由于在进行金属电镀前其表面没有进行良好的清洗造成的。下列几种方法常用来活化铜金属表面。

1） 溶剂清洗或去油脂；
2） 碱洗；
3） 机械清洗。

上述几种工艺在第 7 章的图像传输技术中有详细的描述，在表面清洗过后，印制电路板将施加各种保护膜或应用电镀技术，以防止其被侵蚀并增加焊接性。

8.3 电镀技术

印制电路板的电镀或金属覆膜可采用以下三种技术：

1） 浸镀；
2） 化学镀；
3） 电镀。

8.3.1 浸镀

浸镀是一种最简单的技术，基板上沉积的金属覆层被盐溶液中含有的镀层金属置换，基板上的金属将溶液中的金属离子还原成原子。

尽管这个方法所需的费用较少，而且在凹陷处可以获得良好的沉积量，但它只能获得有限的沉积厚度。这是因为当基板金属快要完全被沉积金属所覆盖

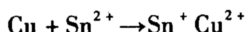
时，化学反应的速度就会变得越来越慢，此时基板所得到的镀层上有不连续的小孔。有限的镀层厚度只能提供短期的保护，因此，浸镀只能用于元器件立即进行组装的场合。浸镀通常只用于两种镀层金属，即锡及其合金以及金。

印制和蚀刻电路板通过将板子浸没到锡溶液中进行镀锡，以使金属锡沉积到金属铜的表面，此时溶液中溶解的铜的量等于印制电路板上沉积的锡的量，其典型的沉积速度为每小时3μm或更少。

典型的锡溶液成分如下：

1）硫酸锡	5～8g/l
2）硫脲［CS（NH_2）$_2$］	70～80gms/l[⊖]
3）硫酸	10～15ml/l
4）电解槽工作温度	30℃
5）浸没时间	5～20min

其上将要镀锡的铜形成一个电解池，由于电离作用而存在的电极上的电压称为电极电压，浸液槽中发生的化学反应如下：



$$Cu + Sn^{2+} \rightarrow Sn^{+} Cu^{2+}$$

Cu^{2+}和Sn^{2+}由于缺少两个电子，是带正电荷的金属离子，铜的电极电位可以通过在锡溶液中添加络合剂来使其具有负极性，硫脲常作为络合剂来形成稳定的配合物。

金的浸镀：它的优点主要在于金的镀层几乎没有空隙，金的浸镀的典型配方设计每半个小时就能镀0.025μm。

8.3.2 化学镀

随着镀通孔技术的引进和多基板的开发，需要在钻孔的绝缘区域提供铜层来为多层印制电路板不同的层之间提供连接以便导电，完成这一任务的最常用的办法就是采用化学镀铜。一旦树脂表面具有传导性，就可以采用电镀来生成所需要的厚度的铜层。

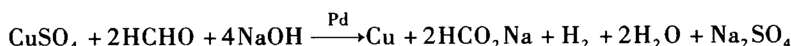
基板上钻好通孔以后，在蚀刻过程进行之前就可以进行电镀过程了，化学镀铜有赖于许多不同的工艺、化学反应、设备和材料（Hodson，1991）。这几个要素的配合决定了电路板互连的质量和最终的性能。

化学镀的机械装置与电镀的相同，但其电子是从化学还原过程中获得的，在电镀过程中，电子是从电流源获得将金属离子还原为金属状态，但对于化学镀来讲，不使用额外的能源。化学镀的过程非常简单，化学还原剂将溶液中的金属离子还原成中性的金属原子供沉积使用。随着反应的进行，仅仅将基板浸

⊖ 原书此处原文有误，“gms/l”应为“g/l”。——译者注

没在适当的水溶液中，金属层就会不断的镀在基板上。溶液中的化学还原剂为化学反应提供电子，但此反应只在催化表面进行。

化学镀铜是一个自动催化的浸镀过程，它的实施满足了印制电路板内层和外层之间的电气连接需求。催化表面是其上附有像钯这样的贵金属的一个表面，它对进行的化学还原反应起催化作用。实践中，钻孔的印制电路板通过催化剂被活化而镀上薄薄一层金属钯的薄膜，然后将其浸到铜镀液中，自动催化过程使其不使用电流就镀上一层金属。铜为电镀过程提供所需的导电金属层，化学镀铜中铜的还原反应非常复杂，下面的等式归纳了采用甲醛作还原剂时的沉积过程。



$$CuSO_4 + 2HCHO + 4NaOH \xrightarrow{Pd} Cu + 2HCO_2Na + H_2 + 2H_2O + Na_2SO_4$$

在这一自动催化电镀过程中使用了含有铜离子的水溶液、铜配位剂、甲醛、氢氧化钠和稳定剂等，这些组成和它们的作用如表 8-1 所示。

表 8-1 化学镀镀液的组成及其功能（经 Hodson 同意，1991）

	成分	功能
铜盐	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	提供铜
还原剂	HCHO	$Cu^{2+} + 2e \rightarrow Cu^0$
配位剂	EDTA、滴定液 酒石酸钾晶体	保持 Cu^{2+} 在溶液中的高 pH 值，控制反应速度
pH 值控制剂	NaOH	控制 pH 值，对 HCHO 还原反应讲 11.5～12.5 为最佳
添加剂	NaCN、金属、S、N CN 有机物	增加稳定性、增加光亮度、加快反应速度

Keeler（1990a）阐明了双面印制电路板脱除过程中，应用化学镀的方法，在钻孔孔壁上镀一层铜来为印制电路板的上层和底层之间提供电气连接。对于多基板来讲，镀通孔的孔壁不仅提供外面两层的互连，还提供内层电路的互连，通过电镀使各层连接在一起。

在采用加成工艺制作的电路板上，除了钻孔和导通孔要进行镀铜外，还要使用化学镀的方法在空白基板上形成电路图形，相应的在采用半加成制程工艺中，只是最初的铜层利用化学镀铜镀液进行沉积，余下的金属铜则通过电解沉积在印制电路板上。

8.3.2.1 化学镀工艺

化学镀铜的程序比较复杂，严格的化学镀铜过程将根据基板的不同尺寸和类型以及产品产量需求而不同。有许多种化学溶液和化学镀设备的提供商采用或多或少相同的工艺来制造不同的产品，因此，为了保证化学镀铜的正确实施，制造者必须理解错综复杂的化学镀过程和设备以及印制电路板所用基板的材料。通常，需要按顺序执行下列操作来完成印制电路板的化学镀工艺。

1）基板修边；

2）基板清洁；

3）水漂洗；

4）多基板的微蚀刻与深腐蚀；

5）水漂洗；

6）浸到浓度为20%的硫酸中；

7）水漂洗；

8）感光剂浸渍；

9）活化剂/催化剂处理；

10）水漂洗；

11）加速剂浸蘸；

12）水漂洗；

13）化学镀（化学镀铜）；

14）酸漂洗。

1. 基板修边

钻孔电路板的表面需要用去毛刺的修边机器和320等级的金刚砂去刷进行清洁。

2. 基板清洁

在这一步骤中，用碱性的清洗液清洁所钻的通孔以去除灰尘和残留物，它可以去除指纹、油类、脂类层和环氧污迹。溶液中包含混合碱性化学物质，槽液的温度保持在60~70℃，浸泡的时间大约为20min。

3. 水漂洗

在每一个工艺步骤完成后，需要漂洗基板以保证化学物质不被传递到下一种槽液中，因为每一步化学反应所使用的化学物质都会污染其他槽液。

4. 微刻蚀

完成此项工作需要过硫酸、硫酸、过氧化氢和稳定剂，用于微蚀刻或清洗已经存在于基板上的铜的表面。在该过程中，一部分铜从铜的表面去除而溶解在溶液中，以提供一个均匀的铜面，微蚀刻的重要之处在于它保证了金属表面的均匀性，增加了铜层间的粘接能力，同时也消除了影响氧化作用的杂质。回蚀方法仅用于多层镀通孔制作过程以清洗孔壁。

5. 浸酸

浸硫酸过程可以去除电路板微刻蚀工艺的残迹，如果基板浸到硫酸中，则在进入预催化阶段之前必须进行清洗，浸硫酸过程使用20%的硫酸溶液。

6. 感光剂浸渍

这是一个预催化阶段，为基板进入下一个阶段，即催化阶段作准备。此时

所用的镀液为酸和盐的组合，为氯化亚锡和盐酸的混合物。此时的镀液槽也作为活化阶段的预热器。

7. 活化剂/催化剂处理

活化和催化是一种表面处理过程，它使基板的表面和孔壁与铜更容易结合，这里的感光剂和活化剂混合在镀液中形成混合催化溶液。混合催化剂产生钯的催化剂膜，该催化膜只生成于绝缘体（树脂和填充料）的表面，而铜箔和基板保持未活化的状态。这一薄层钯膜提高了基金属铜和镀铜之间的粘接度。

感光步骤包括将电路板浸到含有二价锡离子的酸性溶液（感光剂）中，这些锡离子被树脂的表面所吸收。二价锡离子还原钯离子，在还原反应中二价锡离子被氧化为四价锡离子。在下一个步骤中金属锡被移出，仅留下一层金属钯以供镀铜。

活化槽/催化槽的温度非常重要，在镀液中需要使用气泵来搅拌溶液以使整个镀槽中的温度均匀。

由于镀液的挥发性，电路板必须进行彻底的清洗以便不对加速剂和后加速镀槽造成污染，通常印制电路板此时进行两个循环的清洗。

8. 加速剂浸蘸

加速剂是一种强酸或强碱，其作用是从催化剂镀液中去除胶状的锡，由于镀槽中的残留物会中和化学镀铜镀液，因此这一步的清洗仍旧非常重要。

9. 化学镀铜

在化学镀铜镀槽中铜被镀到钻孔的孔壁和基板的表面，这一步可以采用脱除过程或加成过程。脱除过程包含在基板上镀一层导体铜，然后再进行电镀，这样通过阻剂和蚀刻就产生了基板上的电路图形。

加成过程中，基板只进行一次铜处理，加成过程使基板的通孔和电路图形同时完成金属化，因此不需要进行电镀。随着工业推动高密度印制电路板的发展，加成镀的使用也越来越广泛，这是因为与采用标准蚀刻工艺制造的电路板相比，加成过程可以制造出适合表面安装技术所需要的更精细的线路。加成镀更受欢迎的另一个原因是它用金属处理的通孔外观更加均匀。

化学镀铜的镀液分为两类：

1）室温；

2）热溶液。

室温镀液典型的成分如下：

1）硫酸铜	5 ~ 10g/l
2）酒石酸钠钾	40 ~ 50g/l
3）甲醛	10 ~ 20ml/l
4）氢氧化钠	10 ~ 15g/l

5）碳酸钠	5g/l
6）氰化钾	1～10ppm
7）润湿剂	0.5ml/l

以下为室温镀液典型的操作参数：

1）温度	15～30℃
2）pH 值	11～13
3）沉积厚度/h	1～1.6μm

这些操作条件可以得到薄薄一层金属铜，并足以在 15～30min 内供后续的电镀使用。

室温镀槽不适合加成过程，因为其沉积速度太慢，加载量为 1～1.2dm^2/h。

基于 EDTA[⊖]稳定剂的热溶液，即使在刚刚高于环境温度的条件下也能很好的稳定镀液，其中的乙四醋酸盐作为配位剂或螯合剂。下面是热化学镀溶液的一个典型配方：

1）$CuSO_4$—$5H_2O$	5～10g/l
2）EDTA	5～25g/l
3）甲醛	10～20ml/l
4）氢氧化钠	10～20ml/l
5）氰化铜	1～10ppm
6）稳定剂（乙烷、聚乙烯、硅氧烷）	200ppm
7）润湿剂	0.5ml/l

高温镀液典型的工作条件如下：

1）温度	35～70℃
2）pH 值	11～12
3）沉积厚度/h	3～8μm

在这一过程中，镀铜的速度随着温度、铜的含量和甲醛含量的增加而增加，但 EDTA 和氰化铜的作用刚好相反。高速的镀槽对杂质更加敏感，也更不稳定，所以需要更加频繁的对其镀液的成分进行控制和调整。

热镀液常常用于加成过程，一层 25μm（1mil）厚的导体通常在 6～12h 内就能镀好。

由于镀液不断的重复使用，其化学参数也随着时间而变化，这些变化会改变铜的动态性能。必须不断的密切监控镀液的化学参数，因为一旦其失去平衡，镀铜的质量将大受影响，可能会导致铜层覆盖不足（破洞），镀铜层发生裂纹甚至镀层材料从通孔的孔壁上剥落。

⊖ EDTA 为乙四醋酸盐。——译者注

需要通过化学分析手段检查和控制镀液，分析氢氧化钠和甲醛的含量并适时进行补充，镀液的控制和补充程序也随着制造者的不同而不同。

10. 酸漂洗

化学镀铜完成以后，需要用硫酸或磷酸清洗电路板以中和残留在板子上的腐蚀性溶液，然后将其放入防锈镀槽中以防止刚刚镀好的铜层被氧化。接下来，将完成化学镀铜的基板擦洗干净进行闪镀（薄镀）过程。

化学镀的成功决定于铜层的厚度及其与孔壁和基板的粘接强度。影响电镀质量最重要的参数为镀液的化学成分、搅拌和温度。化学镀铜对多层印制电路板的性能影响很大，不论镀铜采用脱除过程还是加成过程，必须进行严格的控制以确保均匀的镀层厚度。

大批量生产需要使用自动镀铜生产线以保证印制电路板的完整性，在这些设备中，通过对温度、溶液浓度以及镀液的活性等参数进行连续不断的监控和控制，使保持产品的一致性成为可能。在不需要大批量生产的情况下，可以使用手工镀铜生产线。

8.3.2.2　化学镀镍

就像化学镀铜一样，工业生产中也经常使用化学方法在基板上镀镍。此时镀液的温度较高，可达到90℃，pH 值的范围为 8 ~ 10。使用次磷酸钠作为还原剂，通过添加氢氧化铵来调节镀液的 pH 值，典型的镀液成分如下所示：

碱性化学镀镍溶液的典型值：

1）氯化镍	30g/l
2）次磷酸钠	10g/l
3）柠檬酸钠	100g/l
4）氯化铵	50g/l
5）pH 值	8 ~ 11
6）温度	(90 ± 1)℃

化学镀镍用于加成制作过程。

8.3.2.3　化学镀金

化学镀金的效果要好于浸镀法镀金，与化学镀镍相似，它使用次磷酸钠作为还原剂，使用柠檬酸钠作为络合剂。镀液的温度为 90 ~ 95℃，其 pH 值范围是 7 ~ 8，典型的镀液成分如下所示：

1）氰化亚金钾	2g/l
2）柠檬酸钠	50g/l
3）氯化铵	75g/l
4）次磷酸钠	10g/l
5）pH 值	7 ~ 7.5

6）温度　　90～95℃

该工艺用于全加成制作过程中印制电路板板边连接器部分的电镀。

与其他表面电镀材料相比，金是一种昂贵的金属，在许多应用中它都有无可比拟的优点，但它的全面应用也具有一些局限性。其缺点是如果控制不得当，焊接点处的金会发脆，导致焊接点过早失效，因此，当指定金作为镀材时，操作者应当特别小心仔细。Bank（1995）指出如果控制得当，印制电路板上镀金的焊垫可以提供高度有效的焊接性保护且对焊接点没有不良影响。

8.3.3 电镀

8.3.3.1 电镀铜

在印制电路板上镀铜用来增加基板表面铜层和钻孔孔壁的厚度，基板表面镀层的厚度为70μm，通孔上的厚度为30μm，镀铜主要用于在双基板和多基板的通孔中建立镀层。铜有许多优良的性能使其广泛使用于印制电路板工业中，但在焊接和装配过程中，有时电路板会处于严酷的环境条件，因此，要求电路板必须具有良好的附着力和热膨胀性能。商业上可用的配方设计有好几种，但工业上首选的为使用酸性硫酸铜溶液，其成分包括硫酸铜、硫酸、氯离子和有机添加剂。

镀液成分的重要作用如下所示：

1）硫酸铜：提供金属铜离子；

2）硫酸：提高离子的活动能力，增加溶液的导电性；

3）盐酸：提高阳极溶解的均匀性；

4）添加剂：增加阴极的湿润性，添加润湿剂，使阴极上所镀的铜层均匀。

酸性镀液的典型成分如下：

1）硫酸铜（$CuSO_4$）	75～100g/l
2）硫酸（H_2SO_4）	90～110ml/l
3）盐酸	（30～70）$\times10^{-4}$%
4）添加剂和润湿剂	4～8ml/l

最常用的添加剂是明胶和酒石酸钾。

为获得均匀一致的镀层最佳的操作环境如下所示：

1）温度	25～30℃
2）阳极电流密度	150～300A/m^2
3）阴极电流密度	300～600A/m^2
4）搅拌	强劲的无油空气流通阴极运动连续的溶液过滤

5）阳极　　磷，脱氧铜（含0.03%的磷）

6）阳极罩　　聚丙烯

7）吊钩　　不锈钢（316级不锈钢或钛）

8）阳极阴极比例　　2:1（最小）

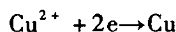
9）阳极与阴极之间的距离　　15cm（最大）

10）电镀速度　　1μm/min

11）镀液中的氯化物含量　　40ppm

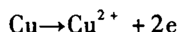
电镀铜层的厚度通常是25μm，执行电镀时电流密度为300A/m^{2}时需要40min，电镀时将电路板放在架子上垂直浸没在电解槽中。架子与电池的阴极棒相连，阳极通常是垂直的铜棒。

溶液中的铜离子被吸引到阴极，在那里得到两个电子，沉积下来成为金属铜：



$$Cu^{2+}+2e\rightarrow Cu$$

阳极根据下列反应溶解在溶液中：



$$Cu\rightarrow Cu^{2+}+2e$$

以上两个反应同时发生，它们由镀液中从阳极流到阴极的电流而引起，电流在镀液的外面同样流动。

电镀铜必须满足在延展性、抗张强度、耐疲劳性、低电阻率、低孔隙率以及与化学镀铜较强的粘接度等一系列指标上满足严格的要求。这些性能多数不仅依赖于镀液的组成，还依赖于其操作条件。实际应用中，很难对铜的镀层进行测试，镀层的质量经常根据其外观来判断，也可以采用微观结构检测作为一种间接的质量控制方法。

与镀层厚度有关的一个参数称为“分布力”，它定义为镀入通孔一半深度位置处镀层厚度与电路板表面镀层平均厚度的比值，如果电路板在全部可镀区域的镀层都很平整，则其分布力等于1。由于钻孔垂直于电路板，较高的深镀能力可以使钻孔内部经受更强磨损而印制电路板表面的镀层依然不会超出厚度。

印制电路板在以下两个不同的阶段都进行镀铜：

1）全板镀铜；

2）线路镀铜。

镀铜过程的流程图如图8-4所示。

全板镀铜工艺包括：

1）化学镀铜；

2）检验；

3）浸酸（10%的H_2SO_4）；

4）水漂洗（去除矿物质水）；

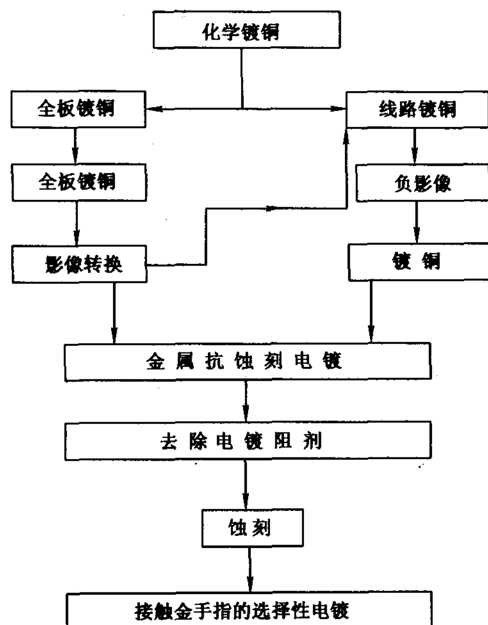


图 8-4　镀铜的工艺流程图

5）镀铜；
6）水漂洗；
7）干燥；
8）覆盖阻剂膜（网板阻剂和干膜阻剂）。

线路电镀工艺包括：

1）化学镀铜或电镀铜；
2）覆盖阻剂膜（曝光和显影）；
3）采用喷洒的方法进行水清洗；
4）浸酸；
5）浸水（去除矿物质水）；
6）镀铜；
7）水漂洗；
8）浸酸；
9）水漂洗（去除矿物质水）；
10）阻剂金属敷膜；
11）水漂洗；
12）脱膜和蚀刻。

8.3.3.2 电镀锡

纯净的锡由于具有良好的焊接性、电镀过程容易控制、具有耐腐蚀性和金属耐蚀性等优点，已被广泛应用于印制电路板电镀中。同样还推荐元器件的引脚也镀一层锡。

镀锡工艺有多种方法可以选择，采用酸性硫酸锡电解液是应用最广泛的一种镀锡系统，与电镀铜相类似，镀锡采用硫酸类镀液。

镀锡时镀液的成分主要有以下几个功能：

1）硫酸锡：提供锡的金属离子；

2）硫酸：离子运动的媒介；

3）添加剂：增加镀层的平整性和光洁度。

镀液的各种成分包括：

1）硫酸锡（$SnSO_4$）	25～30g/l
2）硫酸（H_2SO_4）	100ml/l
3）添加剂	
4）苯酚磺酸	30g/l
5）明胶	28g/l
6）B-萘酚[㊀]	1g/l

典型的操作环境为：

1）温度	20～30℃
2）阳极电流密度	0.5～1.5A/dm^2
3）阴极电流密度	1.5～3A/dm^2
4）电压	1～3V
5）搅拌	阴极棒运动，不推荐采用空气搅动
6）过滤	连续
7）阳极与阴极的比例	2:1
8）阳极罩	聚丙烯（3～10μm）
9）电镀速度	电流密度为2A/dm^2时为1μm/min
10）阳极	99.99%纯锡棒
11）长度	架子的长度减去5cm
12）吊钩	钛或不锈钢（316级不锈钢）

锡有着均匀的有光泽的表面，电镀后其手感应当光滑。镀液成分的不平衡和工作条件的不合适会使钻孔镀层不均匀，可以使用霍氏[㊁]槽来检验添加剂标准

㊀ B-萘酚，俗称"乙萘酚"。——译者注

㊁ 有的文献中也称为"哈尔槽"。——译者注

的控制和电镀的质量。

8.3.3.3　锡-铅合金的电镀或焊锡镀

锡-铅比例为63:37的锡-铅合金的使用可以使印制电路的表面有光泽，对于专业的镀通孔电路板来讲，它被看作是标准的蚀刻阻剂，因为它对碱性氨水表现出极好的抗蚀刻性，良好的初始焊接性，使电路板保存期长而且相对便宜。

锡-铅合金的性能扮演着重要的角色，这些性能有：

1）镀层的厚度和均匀性；

2）多孔性；

3）焊接性。

对于以上这些性质，合金层的成分起着重要的作用，在一定的范围内，可以通过调整溶液中的锡-铅比例、增加特定的添加剂或调整电流密度来调整镀层的锡-铅比例。

大多数规范规定的锡的比例为50%～70%之间，尽管对于现代镀液来讲，像60%～70%这样一个较窄的范围也可以在电路板的任何部位包括通孔中进行电镀，但含有63%的锡和37%的铅的锡-铅合金最容易熔化，其熔化温度低于铅和锡这两种金属熔点的任何一种，这使得它很容易重熔和焊接。锡-铅镀层的厚度达到8μm就可以抗蚀刻了，但实际应用中表面镀层的厚度常常要达到13～25μm。

1. 镀液成分

目前几乎所有可获得的锡-铅合金都含有高浓度的氟硼酸蛋白胨。这些成分最基本的作用是：

1）氟硼酸锡和氟硼酸铅：提供金属离子；

2）自由氟硼酸：增加镀液的导电性并抑制氟硼酸盐的分解，生成带有线状颗粒结构的镀层；

3）硼酸：增加溶液的导电性并抑制氟硼酸铅分解到氟化铅中；

4）蛋白胨：抑制树枝状矿物结晶和树状晶体的形成；

5）添加剂：增加锡的颗粒沉积；

6）抗氧化剂：阻止锡从二价锡氧化为四价锡。

典型的镀液成分是：

1）氟硼酸锡中的金属锡相当于15～20g/l。

2）氟硼酸铅中的金属铅相当于9～10g/l。

3）自由氟硼酸　　25g/l

4）硼酸　　400g/l

5）添加剂和蛋白胨　　3～5g/l

最佳的操作环境为：

1）温度　　20～30℃

2）pH 值	0.5 或更小
3）阴极电流密度	1.5 ~ 2A/dm^2
4）阳极和阴极的比例	1∶2
5）搅拌	板面缓慢运动
6）阳极	60% 的锡和 40% 的铅
7）阳极长度	架子的长度减去 5cm

铜是镀液最有害的杂质，它在低电流密度区域，特别是在镀通孔内部会导致出现暗斑，甚至会覆盖阳极，故镀液中铜的含量不能超过 15×10^{-6}。

全面的电镀可以使用霍氏槽来检验，该检验也可以给出溶液中所需要的蛋白胨、添加剂或活性炭处理以及溶液中溶解的铜。

2. 热风整平（HAL）

印制电路板上的裸铜容易随着时间的推移而品质恶化，导致外观变差不易焊接，正因为如此，裸铜板只有在实验中和原型试样工作中才会使用。对于高质量的产品，需要使用各种覆膜技术来防止以上现象的发生，最常用的覆膜技术就是印制铜线镀锡，它可以通过轧辊镀锡或电镀来实现，轧辊镀锡的一种改良工艺就是热风整平工艺。

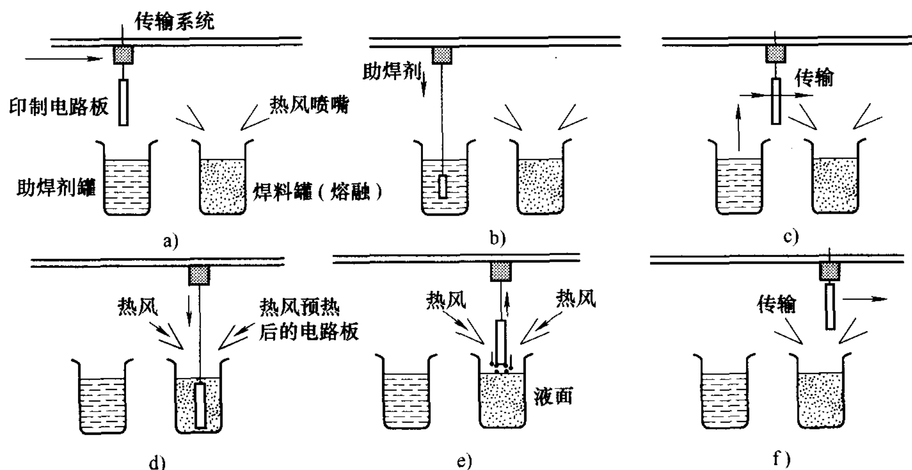


图 8-5　热风整平流程图（经 Haskard 同意重绘，1990）

a）基础要素建立　b）印制电路板浸助焊剂　c）印制电路板从助焊剂中取出
d）用热风对电路板预热　e）用热风整平法使印制电路板浸入焊锡　f）用气刀去除多余焊锡

热风整平是一种应用薄薄一层锡-铅共熔膜覆在印制电路板暴露部分的工艺，这一层沉积物提高了电路板在装配操作中的焊接性。焊料在许多地方优于其他传统的有机覆膜技术，这些焊膜具有较长的保存期限，在组装过程中焊料浸润时间短，机械稳定性高，热风整平工艺独特的性质是在印制电路板组装前就可

以形成金属间键。由于铜箔上镀有焊料，印制电路板在组装过程中可以经受多次焊接与脱焊操作，而对电路板的焊接性没有不利影响。热风整平工艺在 SMD 和紧密引脚距方形封装器件领域也有许多优点。

其程序包括将印制电路板浸渍到纯净的、熔融的焊料中并吹掉气刀间过多的空气，热风整平的步骤如图 8-5 所示。将电路板垂直浸入焊锡槽中，当其从槽液中取出时进行热风烘吹，该过程可以去掉多余的焊锡，清洁通孔并使板面平整整洁。

焊料沉积的质量基本上依赖于板面的清洁程度，因此需要进行预清洗来去除油脂层，指纹和其他可能出现在铜箔表面和通孔中的有机污染物。热风整平包含的步骤如图 8-6 所示。

预清洗通常使用弱酸或过硫酸盐，然后再用清水清洗。热风整平设备本身带有一个已加热的加热室，焊剂处理可以在热风整平设备的内部或外部进行。所使用的助焊剂通常可溶于水，故焊料镀膜以后很容易将其去除。将电路板传输到焊料罐，焊料罐中焊料的温度维持在 250～270℃，镀焊作用就发生在该温度下。焊膜热风整平时气刀的角度可根据电路板上电路图形分布的密度和几何分布来调整，然后使电路板冷却，接着用温的清洁剂进行清洗以去除残留在电路板上过多的助焊剂。

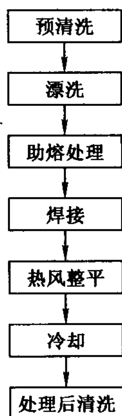


图 8-6 热风整平系统

在多数清洁操作中，使用弱酸来清洗电路板表面就足够了，不能使用热的清洁剂，因为这会导致板边连接器铜带起翘，致使焊料沉积在板边连接器镀金层上。当电路板铜面特别脏时，通常将过硫酸盐与其他化学物质一起使用，然后将电路板用清水进行彻底的清洗。

对于热风整平设备，有单机的和装有运输带高生产率的设备，从功能上讲，该设备包括助焊剂单元、焊锡罐和热风气刀。电路板最初固定在一个通过压缩空气推动的脚踏开关控制的夹具上，首先将电路板浸没到助焊剂单元中大约 15s，然后在热的焊锡罐中仅仅浸蘸大约 5～8s（温度维持在 250℃左右)。进行焊锡覆膜以后，将电路板从焊锡罐中取出，穿过一系列的热风气刀，热风气刀的气压和角度根据电路板的几何形状进行调整。通过调整热风气刀，就可以将电路板表面以及印制通孔内的焊锡整平。热风整平设备通常由不锈钢制造，所有的有压缩空气推动的夹具和加热设备都由可编程序逻辑控制器（PLC）来控制。

所有的多基板在进行镀膜前应当预热，为保证将封陷在基板内的湿气和气体完全去除，需要在 120℃（250°F）的环境下加热 1～2h，并要保证在热风整平操作中印制通孔壁不发生破裂。

8.3.3.4 电镀镍

镀镍通常用作稀有金属，例如金的内涂层，它作为阻挡层阻止铜原子的移动并增加电镀涂层的耐磨性，相应的减少了在给定应用下所需金的沉积最小值。

通常对于镀镍来讲，将氨基磺酸镍溶液与润湿剂结合使用，一般情况下镍的涂层厚度为4~6μm，氨基磺酸镍既用于通孔电镀的内涂层，也用于板边金手指的内涂层。

典型的镀镍溶液成分包括：

1）氨基磺酸镍	350~750ml/l
2）氯化镍	15g/l
3）硼酸	30g/l
4）添加剂	根据需要而定

最佳操作环境为：

1）温度	45~60℃
2）pH值	3.5~4.5
3）阴极电流密度	2.5~10A/dm^2
4）阳极	滚动去极化棒或夹板
5）吊钩	钛
6）阳极罩	聚丙烯
7）长度	架子的长度减去5cm
8）搅拌	溶液通过过滤泵循环或阴极运动
9）沉积速度	当电镀电流为25A/ft^{2}时，10~15min可以镀4μm厚的镀层

与镀镍相关的一个重要参数是“应力”，它会造成沉积层的破裂。氯化镍的浓度较低会引起阳极腐蚀（镍的含量迅速下降），氯化镍的浓度较高会造成应力过大。为了阻止这种情况的发生，pH值、电流密度和硼酸需要维持在指定的限度内。镀槽的操作条件以及污染物的含量可以通过霍氏槽来检测。

8.3.3.5 电镀金

金在本质上是软的，为了提供所需的亮度并增加硬度，经常将其与少量的镍、钴或铟组成合金，它具有优良的导电性、良好的抗蚀刻性和耐蚀性能。尽管早期的印制电路板技术广泛的使用金属金，但由于焊接问题和高昂的成本，现在的印制电路板不进行全板镀金，金只用于印制电路板板边连接器区域和所选择区域的电镀，用以提供较低的接触电阻和较高的耐磨性。

通常，根据用户的要求对板边连接器进行镀金，大多数情况下板边连接器内涂层的镀镍厚度为4μm，它的外面再镀5μm的金。为了加强对镀层厚度的控制，对金进行有效的利用，提高生产率和质量，需要使用自动电镀设备。为了

进行工艺控制，需要将金的含量、pH 值和密度维持在最佳值，为了对 pH 值进行控制，可以添加氢氧化钾来提高 pH 值，使用酸式盐来降低 pH 值。溶液的导电性可以由密度来控制，通过传导单元进行调整。

金从碱性、弱碱性、中性或酸性镀液中电镀沉积作为接头或高频导体涂层。可以使用多种镀液来电镀，既可以镀出 24 克拉㊀纯金也可以镀出金与各种金属例如镍、钴或铟等的合金，相应的也可以根据印制电路板设计者的需求裁减镀金层。镀金电解液可以分为以下四类：酸性金电解液；中性金电解液；碱性金电解液；硫酸盐金电解液。

(1) 酸性金电解液

其 pH 值范围为 3.5 ~ 4.5，并包含镍或钴，它提供的镀层用于印制电路板连接插头或板边连接器，镀层的厚度限制在 5μm 左右。然而，通常的印制电路板导体镀层厚度包括连接插头，为 1.25 ~ 2.5μm。Price (1992) 阐述了精细线路表面安装印制电路板镀镍/金为电路板组装者提供了极大的益处。

(2) 中性金电解液

中性电镀液（pH 值为 6.00 ~ 8.5）可以方便的沉积 99.9% 的纯金镀层，其操作温度为 35 ~ 45℃，这类镀层最适合用于板边连接器。

(3) 碱性金电解液

其 pH 值范围为 8.5 ~ 13.8，它在印制电路板制造中使用的不是很广泛，因为其对覆铜板会产生有害的影响。

(4) 硫酸盐金电解液

它能够方便的在整个电路板上镀上一层纯度为 98.0% ~ 99.9% 的均匀分布的镀金层，采用亚硫酸盐溶液与传统的酸性镀液相比，可以节省 20% ~ 40% 的金。但其缺点在于它对 pH 值的改变非常敏感，例如，若 pH 值降低到 8 以下，则金就会迅速地减少。

所使用的酸性镀液成分为：

1) 氰化钾金	6 ~ 10g/l
2) 钴	0.15 ~ 0.25g/l
3) 柠檬酸钾	添加到电解液中使其密度维持在 10 ~ 15 波美㊁

㊀ 1 克拉 = 2×10^{-4}kg。——编辑注

㊁ 波美度，是一种表示溶液浓度的方法，因法国化学家、巴黎药学院教授波美（Antoine Baume）创制的液体比重计——波美比重计而得名。波美比重计分为重表和轻表两种，分别用于测量比水重的液体或比水轻的液体。生产中，将波美比重计浸入待测溶液中，得到的读数值即为波美度，其数值较大、读数方便，且从相应化学手册的对照表中可以方便地查出溶液的质量百分比浓度。例如，对于在 15℃时测得浓硫酸的波美度是 66°Be，查表可知其质量百分比浓度是 98%。——译者注

酸性镀液的操作环境为：

1）温度	30～40℃
2）pH值	3.8～4.5
3）阴极电流密度	0.3～1.5A/dm^2
4）阳极	镀铂钛
5）吊钩	镀铂钛
6）搅拌	无油空气搅拌和阴极运动
7）镀层成分	99.8%或99.7%的金 0.2%～0.3%的钴
8）沉积速度	当电流密度为1.0A/dm^{2}时，13t镀液可以镀5μm的厚度

镀金目前只用于没有其他可能选择的应用领域。

在印制电路板制造过程的镀金工艺中，感光阻剂缺失会造成过多的镀金废料，这一问题困扰印制电路板制造行业有许多年了，Anderson（1998）建议在镀金生产线上应用实验计划法技术来帮助确定可靠的因素并提供克服这一问题的溶液。

8.4 电镀中的常见问题

如果工艺参数保持的不合适，则会使电镀质量变差。电镀后可能出现的问题如下：

1）布散能力不足；

2）焊接性不好；

3）不正确的阳极腐蚀；

4）表面缺陷（盖孔、凹点、破洞、针孔和夹杂物）；

5）镀液寿命短；

6）镀层不光亮。

因此，需要使工艺参数保持不变以使镀液的成分、温度的变化最小，污染物最少。

8.5 常见的电镀缺陷

8.5.1 破洞

在化学镀过程中，如果钻孔不正确或通孔的清洁不当，则会导致气体或有

机化学物质残留或积累在孔壁上，当电路板进行波峰焊或预热时，残留的气体或化学物质在高压下会造成孔壁的不连续或裂纹，这些都称为破洞。图 8-7 给出了镀通孔典型的铜壁破洞的垂直横截面图解。

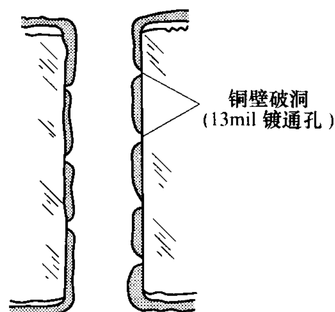


图 8-7 镀通孔铜壁破洞垂直横截面图解

8.5.2 吹孔

在电镀或覆铜制造过程中，会有一些空气残留在铜层之间或铜层与基材间，当电路板遭受到类似焊接工艺的高温时，这些气体会释放出来，导致电镀图形上出现裂纹，引起吹孔，小的破洞也会导致吹孔。

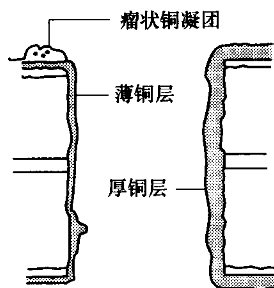


图 8-8 镀通孔垂直横截面图解

注：由于混有杂质粒子，表现出镀铜层薄厚不均，以及形成瘤状铜凝团。

8.5.3 吹气

锡-铅表面熔化时会形成针孔凝团或小的“火山爆发”状结构，如图 8-8 所示。这是由于在锡铅电镀过程中有机添加剂的伴随沉积造成的，这可以通过间歇碳酸饱和处理进行纠正。

8.6 特殊电镀技术

8.6.1 通孔电镀

有多种方法可以在基板钻孔的孔壁上建立一层合乎要求的电镀层，这在工业应用中称为孔壁活化，其印制电路商用生产过程需要多个中间贮槽，每个贮槽都有其自身的控制和养护要求。通孔电镀是钻孔制作过程的后续必要制作过程，当钻头钻过铜箔及其下面的基板时，产生的热量使构成大多数基板基体的绝缘合成树脂熔化，熔化的树脂及其他钻孔碎片堆积在孔洞周围，涂敷在铜箔中新暴露出的孔壁上，事实上这对后续的电镀表面是有害的。熔化的树脂还会

在基板孔壁上残留下一层热釉，它对于大多数活化剂都表现出了不良的黏着性，这就需要开发一类类似去污渍和回蚀化学作用的技术。

更适合印制电路板原型制作的一种方法是使用一种特别设计的低黏度的油墨，用来在每个通孔内壁上形成高黏着性、高导电性的覆膜。这样就不必使用多个化学处理过程，仅需一个应用步骤，随后进行热固化，就可以在所有的孔壁内侧形成连续的覆膜，它不需要进一步处理就可以直接电镀。这种油墨是一种基于树脂的物质，它具有很强烈的黏着性，可以毫不费力的粘接在大多数热抛光的孔壁上，这样就消除了回蚀这一步骤。

8.6.2 卷轮连动式选择镀

电子元器件的引脚和插针，例如连接器、集成电路、晶体管和柔性印制电路等都是采用选择镀来获得良好的接触电阻和抗腐蚀性的。这种电镀方法可以采用手工方式，也可以采用自动方式，单独的对每一个插针进行选择镀非常昂贵，故必须采用批量焊接。

通常，将辗平成所需厚度的金属箔的两端进行冲切，采用化学或机械的方法进行清洁，然后有选择的采用像镍、金、银、铑、钯或锡镍合金、铜镍合金、镍铬合金等进行连续电镀，如图 8-9 所示。

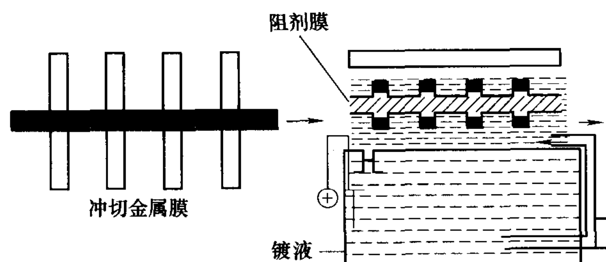


图 8-9　卷轮连动式选择镀工艺

在选择镀这一电镀方法中，首先在金属铜箔板不需要电镀的部分覆上一层阻剂膜，只在选定的铜箔部分进行电镀。

8.6.3 刷镀

另外一种选择镀的方法称为“刷镀”，如图 8-10 所示。它是一种电沉积技

术，在电镀过程中并不是所有的部分均浸没在电解液中。

在这种电镀技术中，只对有限的区域进行电镀，而对其余的部分没有任何影响。通常，将稀有金属镀在印制电路板上所选择的部分，例如像板边连接器等区域。刷镀在电子组装车间中维修废弃电路板时使用得更多。

将一个特殊的阳极（化学反应不活泼的阳极，例如石墨）包裹在有吸收能力的材料中（棉花棒），用它来将电镀溶液带到所需要进行电镀的地方。

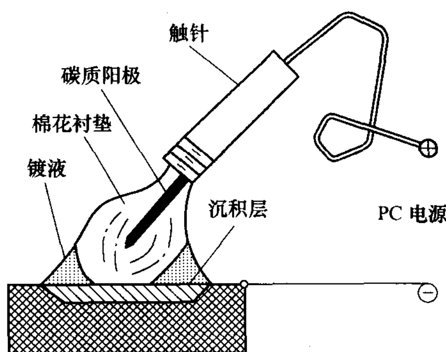


图 8-10 刷镀工艺规程

8.6.4 指排式电镀

常常需要将稀有金属镀在板边连接器、板边突出接点或金手指上以提供较低的接触电阻和较高的耐磨性，该技术称为指排式电镀或突出部分电镀。

常将金镀在内层镀层为镍的板边连接器突出触头上，其工艺如下所述：

1）剥除涂层	去除突出触点上的锡或锡-铅涂层
2）清洗	水漂洗
3）擦洗	用研磨剂擦洗
4）活化	浸没在 10% 的硫酸中
5）在突出触头上镀镍	厚度为 4 ~ 5μm
6）清洗	去除矿物质水
7）金渗透	溶液处理
8）镀金	
9）清洗	
10）烘干	

金手指或板边突出部分采用手工或自动电镀技术，如图 8-11 所示，目前接触插头或金手指上的镀金已被镀铑、镀铂、镀钯所代替。

8.6.5 金属导体糊剂覆膜

金属导体糊剂通常由稀有金属粉末构成，这些粉末悬浮在有机载液中，银、金、钯、钯金或铂金都可以使用这一方法。

这类糊剂常用于在像陶质基板等非导体上采用丝网印制的方法印制导电图形，这些印制混合物经烘干后最终在适宜的温度下进行烤炉烘烤。

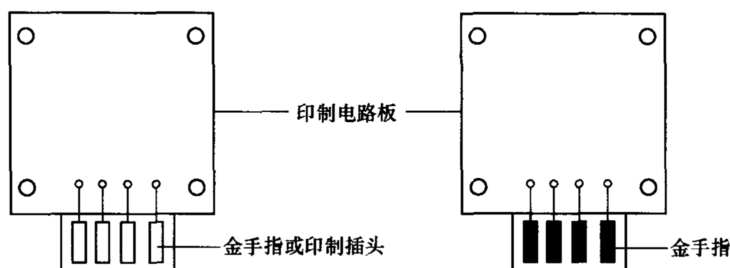


图 8-11　印制插头电镀技术

8.6.6　还原银喷洒

还原银喷洒常为在非导体上采用其他电镀技术进行后续镀膜提供导电图形底涂层，其执行过程如下列步骤所示：

1）对绝缘材料表面进行清洁以使其对氯化锡溶液敏感；

2）将混合银溶液通过喷嘴喷洒在敏化后的表面，混合溶液的组成为硝酸银、蒸馏水、氨水和氢氧化钠；

3）喷洒还原溶液，其组成为水、右旋糖和硝酸；

4）在表面上形成一层均匀光亮的金属银。

该工艺常用于柔性加成印制电路板。

8.7　金属分布与镀层厚度

印制电路板上金属的分布与镀层的厚度依赖于电镀槽的工艺控制，可通过以下三个方法实现：

1）溶液分析或湿式化学分析；

2）溶液的物理测试；

3）电镀测试。

8.7.1　溶液分析（湿式化学分析）

湿式化学分析在电解过程中用来确定下列各项：

1）金属离子的浓度；

2）酸的浓度；

3）碱的浓度；

4）氯化物的浓度；

5）金属杂质。

采用传统的湿式化学分析方法对金属或非金属镀液进行成分分析前，仔细研究供应商的说明书是一个明智的选择。这些分析方法多数要使用 pH 值测定仪、特种离子电极、比色计、分光光度计等。可以使用各种技术包括液相色谱法、紫外线和可见光分光光度计、离子色谱法、极谱法以及伏安计等对锡、金、镍溶液中的有机添加剂进行测量。这些方法的细节在化学分析仪器测试方法标准文件中均有介绍，但其细节不在本书的讨论范围之内。

8.7.2　溶液的物理测试

以下为电解液物理测试的相关参数：

1）密度；

2）pH 值；

3）表面张力；

4）霍氏槽测试。

1. 密度

电解液的密度依赖于溶液中的含盐量，它可以使用一种称为液体比重计的仪器进行测量。通过密度的测量可以给出溶液中金属含量的精确值，其含量必须维持在推荐值以内。密度通常用托窝德尔比重[⊖]单位或波美比重单位来表示，它们均可由比重推出，如果密度标度采用波美比重给出，可以使用下面的公式来计算比重

$$\delta = \frac{145}{145 - {}^{\circ}Be'}$$

式中，δ 表示比重（kg/dm^3）；$^{\circ}Be'$表示波美比重度。

表 8-2 给出了波美比重与托窝德尔比重的典型值。

表 8-2　波美比重与托窝德尔比重转换表

比重	波美比重（Baume）	托窝德尔比重（Twaddel）
1.000	0	0
1.100	13.0	20
1.200	24.0	40.0
1.300	33.3	60.0
1.400	41.2	80.0
1.500	48.1	100.0

⊖ 托窝德尔比重计用以测量比水重的液体。——译者注

2. pH 值

pH 值决定了溶液的酸度和碱度，为了测量电镀溶液中的 pH 值，通常使用 pH 值测定仪采用电测法测定，对于高准确度的测量，需要采用数字式 pH 值测定仪。

3. 表面张力

为了消除吹气凹点提高沉积效果，常在电镀溶液中添加表面活性剂（表面活化剂）。例如电镀槽中的酸性铜电镀液中常加入不起泡的表面活化剂使空气搅拌过程中产生的泡沫最少。在工艺控制中，为了溶液中铜的保持需要测量溶液的表面张力，通常使用扭秤来测量溶液的表面张力。该仪器可以用来测量将标准面积的玻璃板与进行测试的溶液的表面分离所需要的力，力的大小通过分度刻盘显示出来。

4. 霍氏槽测试

当需要考虑添加剂的总含量并决定添加多少原料时，可以采用一种简单的技术来进行推断，常采用一种称作霍氏槽的微型电镀槽。霍氏槽测试装置如图 8-12 所示，该电镀槽采用一系列的样品电路板测试电镀来决定镀液何时需要进行调整以及需要添加多少添加剂。

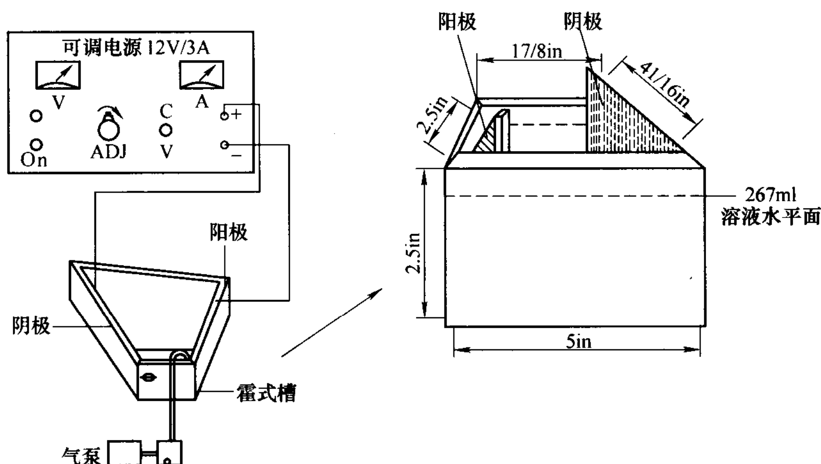


图 8-12 霍氏槽—测试装置（NTTF 注释）

霍氏槽用来对镀槽中锡/铅镀液的状态作出快速的检测，霍氏槽测试与化学分析方法配合使用，可以定性的和定量的分析镀液的主要成分。

当添加的溶液到达电镀槽壁上的标志线时，此时测试样液的容积为 267ml，如果用下列参量来表示：

1）V：电镀槽的容积（l）

2）H：添加到霍氏槽中以生成检光板的添加剂的量（ml）

3）C：主镀槽所需添加剂用量（ml）

则与加入到霍氏槽和需要加入到电镀槽的物质相关的倍增因数为

$$C = (V/0.267) \times H$$

根据电路、时间和温度在指定的条件下进行操作，霍氏槽测试可以给出 pH 值控制指示、污染物以及电镀槽的总体情况，它在镀液和工艺调节方面的帮助很大，对于决定催化剂对油比（添加剂比率）和镀液的不纯净度特别有用。因此，霍氏槽测试已经成为了电镀溶液以及其他相关溶液的测试、控制的最重要和普遍应用的工具。该设备使用简单，价格便宜，决定电解液的质量所需的测试仅需几分钟，其主要缺点是在镀铜过程中像镀层无光泽、不平整以及有凹点等缺陷不能被霍氏槽检测出来。

8.7.3　电镀测试

如果电路板电镀的质量不合格，就会引起许多问题，例如锈蚀、载流约束、粘连、接触电阻以及耐磨性方面的问题。通常电镀的质量通过测试以下参数来确定：

1）金属厚度测试（电路板表面与镀通孔）；

2）疏孔度测试；

3）附着力测试；

4）焊接性测试。

8.7.3.1　金属厚度测试

电路图形以及镀通孔的镀层厚度可以用以下两种方法来衡量：

1）非破坏性方法—β 反向散射法；

2）破坏性方法—微截面法或横截面法。

1. 非破坏性方法

测试印制电路板镀层最常用的非破坏性方法就是 β 反向散射法，其对于导电图形和镀通孔电镀期间和电镀完成后及蚀刻操作开始之前来衡量镀层的厚度是一种特别有用的方法。该方法利用安装在适当探测器上的放射性同位素发出 β 射线，探测器由 β 射线放射源和接收器组成。将检测器放置到需要检测表面厚度的金属镀层上面，探测器发出的一部分 β 射线撞击到金属表面并反射回来，反射回来的射线的强度随着金属镀层厚度的增加而减少。采用适当的标准刻度，β 射线电子计数器直接给出以微米为单位的镀层厚度。该仪器给出的只是镀层平均厚度，它主要用来测量铜箔上金、锡、锡-铅合金镀层的厚度，环氧树脂上铜层的厚度以及铜箔上光阻剂的厚度。要探测较大范围镀层的厚度需要 β 射线粒子交替进行几次探测操作。该技术是一种快速、准确且非破坏性的镀层厚度测量方法，因此它在印制电路板制造的质量控制领域应用非常广泛，一个不熟练

的操作员甚至都可以进行操作。

2. 破坏性方法

最常用的破坏性检测技术是对金属镀层微切片的厚度给出直接的测量，它包括金相学标本的准备以及在显微镜下进行的检验。

将镀金属的印制电路板进行垂直或水平的切割，在显微镜下观察其可见层结构并拍照，这样就可以确定导电图形和通孔壁镀层厚度的变化了。通常使用金刚石圆锯对电路板进行水平横切，并用转轮抛光机采用金刚石磨浆或砂纸进行抛光。将风干的试样放到放大倍数为 30 ~ 1000 倍的显微镜下，对每一个镀通孔壁的三处不同位置进行观察和拍照，通常其报告结果为一个平均值。

这种微切片技术用于薄的镀层会带来较大的误差，例如对于 1μm 厚的镀层，其误差可能高达 50%，但对于较厚的镀层，误差会大大减少，对于 5μm 厚的镀层来讲，其误差只有 2% 左右。

该技术的优点是其可以应用于各种形状的镀层，包括通孔镀层。另外像镀层的数量和类型、均匀性、破洞的情况以及导体的底切等额外的信息也可以很容易的获得，但该方法耗费时间且需要熟练的操作人员操作。

8.7.3.2 疏孔度试验

疏孔度试验用来检测电镀表面如疏孔、裂纹等镀层的不连续。该试验对于金手指特别重要，因为通过镀层的疏孔使基金属受到侵蚀会使金手指的表面电接触性能受到不利的影响，因此，疏孔和裂纹是贵金属镀层的主要测试对象。

镀层上的疏孔可以通过多种技术检测，最常用的是电记录测试和一些气态试剂疏孔度试验。气态试剂试验需要将镀好的印制电路板暴露在二氧化硫中 24h。将样品放入一个容积为 10l 的密闭容器中，并向该容器加入 0.5cm^3 的水和 100cm^3 的气态二氧化硫，过 24h 后将容器打开，向其中注入 100cm^3 的硫化氢并在此时将容器密闭。镀层存在疏孔的位置其基金属会被腐蚀，这可以通过肉眼或显微镜观察到。这种疏孔度试验最常用于铜及其合金基板上金、铂系金属、锡-镍合金镀层的测试。

8.7.3.3 电记录测试

该测试使用硫化镉试纸，将湿润的试纸插入到电路板铜箔与铝板之间并压紧，铜箔充当阳极，铝板作为阴极，使一定的电流流过这种类似三明治的夹层结构。电流经过铜板镀层金属上的疏孔并经过硫化镉试纸流到铝板上，如果此时在硫化镉试纸上有黑色斑点形成，则说明该处的金属镀层有疏孔，没有疏孔的镀层则不会在试纸上形成这类黑色斑点。镀镍的印制电路板常使用这种疏孔度测试，通过这种方法甚至可以发现电路板镀层上的微裂纹。

8.7.3.4 粘接力测试

粘接力表示镀层与金属的结合强度，当镀层的粘接力很差时，可能会导致

镀层裂开或卷翘，粘接力决定了粘接的质量。

为进行这项测试，需要将一条胶带均匀粘压在金属镀层的表面（没有气泡），然后将胶带从边缘处用力拉起，这样金属表面镀层的粘接力就得到了检验。

8.7.3.5 焊接性测试

焊接性是对镀层表面对熔融焊锡完全浸润能力的一种衡量，该测试通常用于抛光完工后的印制电路板。测试时将 $1in^2$ 的经过助焊剂处理的样板与没有氧化物与杂质的焊锡相接触，测试推荐温度为240℃/s。将清洁的电路板用10倍放大镜观察以下几点：

1）浸润：形成均匀的焊锡层；

2）半浸润：焊锡覆盖层不规则；

3）不浸润：焊锡覆盖层不规则且暴露基金属。

试样必须呈现95%的完全浸润才算合格。

8.8 车间规划注意事项

根据经验得知绝大多数的电镀事故都是由于疏忽、缺乏经验、不按照操作规程执行、设备的不当操作、电镀槽和通风系统规划不当、管理保养不良、车间及疏水系统布设不当、化学药品混淆、电镀槽及化学药品标签错误等引起的。以上这些疏失可能会引起爆炸、失火以及有毒气体的泄漏，从而危及健康。

通常在电镀车间所使用的危险化学品的类型有：

1）氢；

2）氰化物；

3）被氯化的溶剂；

4）硫酸；

5）铬酸。

1. 氢

氢的爆炸与电镀清洁器产生的泡沫有关，润湿剂产生的泡沫覆盖层有时会将氢和氧困在电气接触点的周围，可以通过使泡沫远离电气接触点以及正确设置排气系统来消除这一隐患。

2. 氰化物

当使用氰化物电镀槽进行电镀时，推荐使用分离的排水系统和排气系统，操作人员需要佩戴防护面罩。

3. 被氯化的溶剂

在除油装置中使用这些溶剂时其呈蒸气状态或液态，当操作人员或维护保

养人员长时间吸入此类蒸气会对大脑产生不良影响。

烧碱（苛性钠）蒸气暴露于含氯的物质中会引起爆炸，故去油脂区域应当具有良好的排气和通风系统，并且与其他工艺过程相分离。当应用了含氯的溶剂后需要使用独立的清洁和清洗槽，去油脂装置设计或维护不应当危及生命。

4. 酸

在电镀车间中，如硫酸、盐酸、硝酸等用来制成电镀液，将这些物质混和时，需要使用防护服、围裙、手套以及化学护目镜来确保安全，否则任何事故都会伤害脸部及衣服。

通常将酸慢慢地加到水中，当酸注入到水中时轻轻地搅拌溶液，不能将水加入到酸中，这样会引起迅速而强烈的反应引起泼溅，导致操作者暴露皮肤的灼伤。

泼溅的酸和酸蒸气会影响操作者并导致空气污染，所以在电镀车间需要有良好的排气和通风系统、正确的规划以及耐酸的地板。

8.8.1 电镀车间规划

电镀车间的规划与相关工艺有关，电镀工艺有以下三类：

1）自动电镀工艺；

2）半自动电镀工艺；

3）手工电镀工艺。

以上电镀系统包含下列次序：

1）挂架或架线系统；

2）预处理及漂洗系统；

3）电镀系统；

4）后处理及最终漂洗和烘干系统；

5）卸荷系统。

不论所采用的工艺过程是自动的、半自动的还是手工的，上述五项次序安排可以在一个单元中，也可以安排在不同的单元中，整个系统均与中央排气系统相连接。

电镀车间的地板应当是防水的，并应具有耐酸和耐碱覆层（可以是环氧层也可以是沥青层）。在电镀过程中，镀液或清洗溶液的泼溅和洒出是不可避免的，如果地板是水泥的，则会即刻受到影响，需要采用保护膜加以保护。

电镀或清洗所使用的水应当是像蒸馏水或去矿物质水这类纯水，车间内所有暴露的金属装置都应防止酸或碱的侵蚀。为此，这些地点应当使用沥青涂料、氯化橡胶漆、乙烯基涂料或环氧树脂类涂料。在电镀车间中，还应当在显著位置悬挂安全知识挂图并备有急救治疗工具箱。

所使用的水应当从地板或镀槽直接流出并与排水渠道相连接，因此地板铺设时向排水渠道方向应当有一个自然的小斜坡。收集的废水应当在不同的废水处理厂进行处理，经过处理的废水其 pH 值必须达到7～8。排水渠道需再与露天的蒸发系统相连接，如图 8-13 所示。

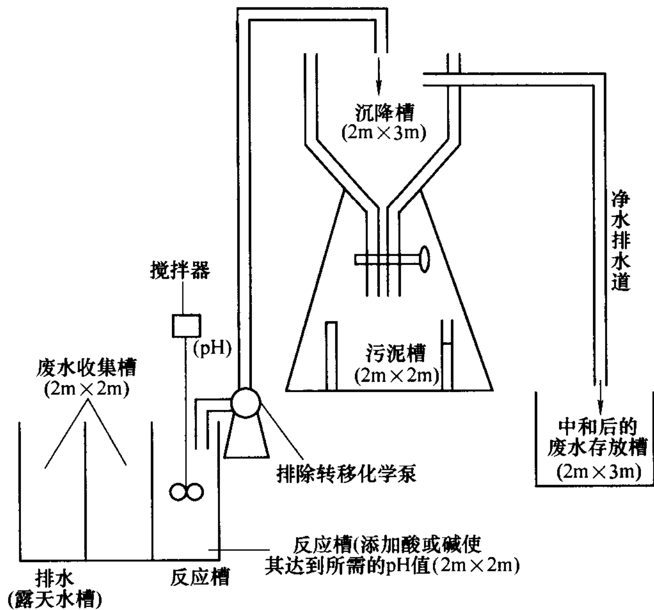


图 8-13　废水处理的排出系统

8.8.2 设备

镀液具有高腐蚀性，应当采取措施保护镀槽和过滤器的墙壁和底部地面。镀槽中的镀液、加热单元、过滤器以及过滤辅助系统都依赖于金属镀液的类型，电镀设备所使用的建筑材料如表 8-3 所示。

表 8-3　电镀设备建筑材料

镀液	镀壳衬里	加热器	过滤器	助滤器
焦磷酸铜	PVC、橡胶、聚丙烯	不锈钢	不锈钢，环氧树脂	纤维素、石棉纤维
酸性硫酸铜	PVC、橡胶、聚丙烯	碳	硬橡胶	非硅酸盐助滤器
酸蚀金	PVC、耐热玻璃、石英 聚四氟乙烯	石英	PVC 衬垫	石棉硅藻土
碱蚀金	PVC、耐热玻璃、聚丙烯 聚四氟乙烯	钛	PVC 衬垫	石棉纤维

（续）

镀液	镀壳衬里	加热器	过滤器	助滤器
锡-铅	PVC、橡胶	不需要	PVC 橡胶衬垫	非硅酸盐助滤器
硫酸镍	PVC、聚丙烯	不需要	PVC 橡胶衬垫	石棉纤维
亮酸锡	PVC、聚丙烯	不需要	316 级不锈钢，硬橡胶	石棉纤维
亮氰化银	硬橡胶	不需要	316 级不锈钢，聚丙烯	石棉纤维

8.9 加成制程

作为制造中等复杂度印制电路板的一种经济的方法，加成制程于 20 世纪 60 年代引入印制电路板制造工业。其耗费成本的节省主要来自于工艺步骤的减少和损耗的消除，损耗的消除是加成制程最基本的特点，它没有损耗，只在电路板上需要的地方添加材料。

加成制程基本上都起始于无披覆基板，即基板上无覆铜层，铜层只是按照电路的设计在基板上所需要的地方有选择地进行沉积作为导体。在其工艺过程的任何阶段都不包括蚀刻，因此铜的用量大大节省，由于没有基材铜来连接导体，故采用化学镀铜来建立导体铜层的厚度。

加成制程需要特殊类型的基板，最常用的基板如下：

1） 酚醛纸质基板，其表面树脂厚度为公称厚度；

2） 环氧基板，其树脂厚度为 30 ~ 50μm；

3） 环氧玻璃，其电镀铝箔上可能粘接也可能不粘接催化剂树脂，制造商将这类基板使用薄膜或厚膜技术。

环氧基板可以直接使用，但是酚醛基板需要一层大面积的覆膜来提高基板和铜箔的粘接度。钻孔以后，将电镀箔采用蚀刻或剥离予以去除，只留下电镀箔下面粗糙的树脂表面以利于粘接。

在印制电路板制造过程中，加成方法可以分为以下三种基本类型：

1） 全加成；

2） 半加成；

3） 部分加成。

以上所有这些加成工艺的共同步骤就是在制造过程的某一点上，它们都包括化学镀铜以形成导体或镀通孔。

8.9.1 全加成制作过程

全加成制程除了在板边连接器和接触点镀一些稀有金属外不需要进行任何

电镀。图 8-14 给出了全加成方法的制造工艺，其依次进行的各个基本步骤讨论如下。

全加成制程以未覆铜的环氧基板开始加工，该环氧基板的表面有充足的树脂，一旦通过钻孔或冲孔完成通孔的制作，就开始对粘接表面进行机械打磨，例如用浮石进行打磨以使电镀阻剂能够更好的粘接。电镀阻剂可以通过丝网印制或干膜压制到基板表面上，其图像与所需的导电图形相反。

将基板上裸露的导体印制线用硫酸或铬酸等强氧化剂进行处理以后，将板材浸没到化学镀铜镀槽中，直到获得设计的铜层厚度。如果希望获得的镀层厚度远远大于 25μm，则需要在镀液中浸没更长的时间，此时镀槽也需要提供更高的化学镀速率和更高的沉积能力以便尽可能多的沉积所需的铜。化学镀有选择的在没有被光阻剂覆盖的区域镀铜，由于不存在铜的蚀刻，故由于工艺缺陷所产生的侧蚀完全不会发生。该步骤完成后，像阻焊剂遮蔽、硬化、铜层用焊接性强的覆膜进行覆盖、将覆膜用锡-铅合金浸渍等一些附加步骤就可以实施，以提高电路板的质量。

以下为全加成制程的两种变形：

1）CC-4 工艺[⊖]通常使用一块经过预催化的基板，在基板的上面覆盖一层同样经过预催化的粘结剂。当铜印制线粘接到基材表面上时，粘结剂也作为绝缘材料。在基板上钻孔以后，将反相电路图形电镀阻剂施加到制程板的表面并固化。

2）下种过程从涂有粘结剂的基板开始加工，其中粘结剂和基板都不进行预催化。钻孔完成以后，将制程板浸没到强氧化剂中，催化并烘干。催化时采用钯（钯基）催化剂溶液，其氢离子浓度指数约为传统印制通孔工艺浓度的 20%。加成表面应当避免破洞、缺口、凹点、凹陷，深度达到 2～3μm 的凹痕是不可接受的。

加成系统有不少优点且可以提供多种应用可能，例如，它可以使用多种类型的基板。由于基板上不必提供铜箔，因而具有节约成本的好处。加成制程相对简单易行，所需的步骤较少，估计可以节约 10%～40% 的成本。采用加成制程时提供的印制电路板的质量参数有一系列的提高，采用蚀刻方法时常见的总浮空和侧蚀不会出现，因此可以制作更精细的导体和图形，相应地提高了电路密度。加成制程可以更好的控制整个板面图形的电镀厚度，包括通孔的内壁以及厚度的均匀性，这就为电路的高频应用提供了可能性。

⊖ CC-4（Copper Complexer #4）加成法制程所用的无铜箔板材，是由美国 PCK 公司在 1964 年推出的。其原理是将具有活性的化学品均匀的混在板材树脂中，使“化学铜镀层”能直接在板材上生长。——译者注

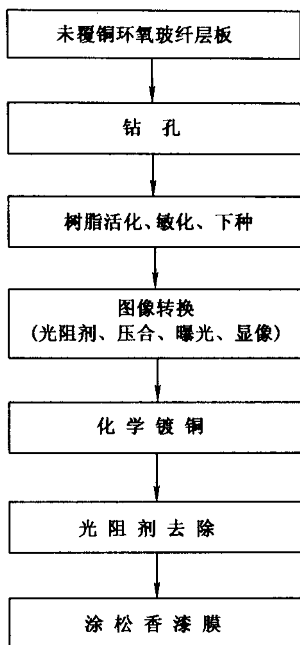


图 8-14　全加成过程：在环氧基板表面覆有足够厚的树脂的电路板上制造双面板印制通孔的主要步骤

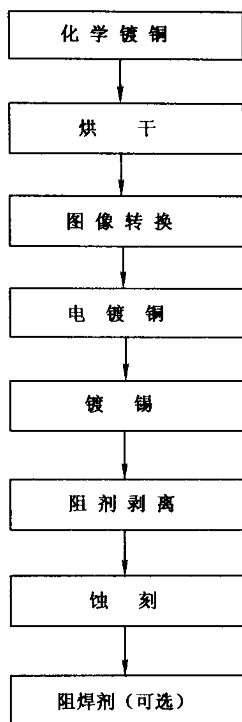


图 8-15　半加成制程工艺流程图

8.9.2　半加成制作过程

半加成制程（见图 8-15）从全板都沉积了铜层的层压板开始加工，该铜层采用化学镀铜工艺镀成所需的厚度，通常为 1.5 ~ 2μm。将图像以只有导电图形可见的方式转换到该电路板上，接着通过电镀的方法在电路图形上沉积更多的铜。该方法比全加成制程所用的步骤多，也受到类似电镀厚度不均匀以及通孔外边缘过分电镀等电解电镀固有问题的困扰，其优点是化学镀铜的稳定性高，与全加成制程化学镀相比所消耗的蚀刻溶液较少。

8.9.3　部分加成制作过程

该制程是蚀刻与化学镀铜的结合，其最关键的工艺步骤如图 8-16 所示。部分加成制程从表面披覆 35μm 厚的铜箔的覆铜板开始加工，对全板进行钻孔和清理毛刺以后，开始进行催化和活化过程，接着通过丝网印制或感光印制在电路

板的两面应用蚀刻阻剂。通过蚀刻形成电路图形，然后将阻剂剥离。对整个电路表面进行网板电镀，电镀时不要遮盖焊垫和通孔，再将制程板浸没到化学镀铜镀液中在焊垫表面和孔壁上沉积大约 30μm 厚的铜层。与其他加成制程相比，该方法有以下几个优点，例如可以方便地使用传统的覆铜板，通过丝网印制的方法形成 80μm 以下的精细的导体线路，形成表面粘接焊垫和均匀可靠的镀通孔（Patterson，1992）。在印制电路板制造过程中采用部分加成制程可以获得比传统电路板更高的应用密度，有以下两个原因：精细线路的蚀刻和微小通孔的化学镀铜。

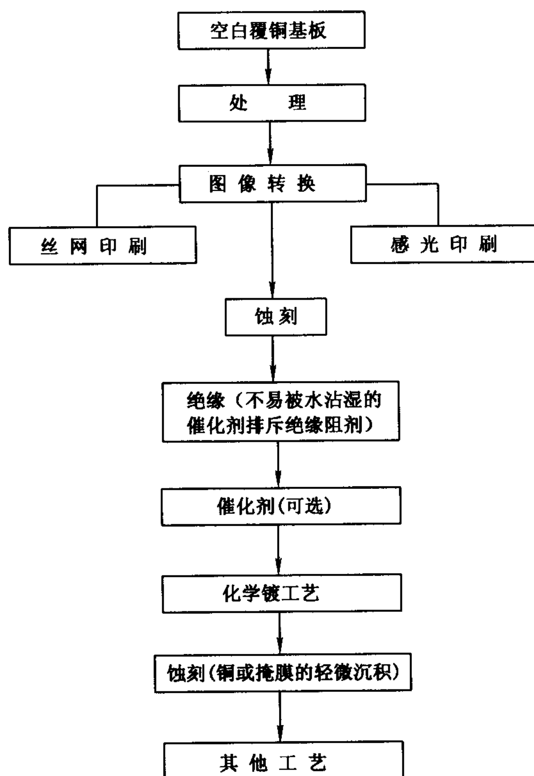


图 8-16　部分加成制程流程图

传统的电路板外层精细电路的制作就是首先进行图形或厚板的电镀，然后进行蚀刻。由于电镀铜层表面铜的不均匀分布，上述每一个工艺过程都受到蚀刻控制问题的影响，如图 8-17 所示。或多或少的蚀刻中的侧蚀会导致线路的宽度和厚度随着所镀铜层的厚度而改变，同样，由于废品率上升，内层电路 6mil 以下电路的蚀刻也很困难且费用昂贵。化学镀铜是生成厚度均匀的铜层的关键，它可以进行均匀的蚀刻，使线路变化较小并提高产量。

在从汽车制造到计算机生产中，都有使用加成技术制造的印制电路板(Nargi-Toth, 1994)。当印制电路板具有复杂的电路图形结构，使用标准的电镀技术导致产出率很低时，使用加成技术就特别具有吸引力。加成制程可以用来制造具有小于5mil的线路和线路间距的印制电路板，也可以很容易的制造具有复杂几何形状电路和具有小的、宽高比较大的通孔的印制电路板。

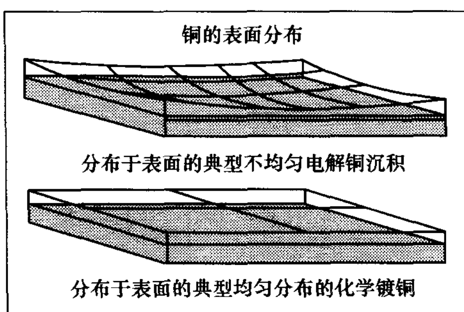


图 8-17 分布于表面的典型的均匀分布的化学镀铜（经 Patterson 同意，1992）

最初的印制电路板上典型的裸板钻孔尺寸为14mil，其宽高比为4: 1（Nakahara, 1991）。电镀完成以后，通孔中增加1mil厚的铜层，通孔的宽高比增长为5: 1。以化学物质产生电流的方法对该宽高比的通孔进行电镀（通过电解电镀），其电流密度值从通常的25～30A/ft^{2}降低到大约15A/ft^2。采用如此低的电流密度，很难进行厚度均匀的电镀沉积，特别是在全板电镀过程中，很难在整个版面保持一个平整的表面。相比较而言，加成制程在小通孔电镀过程中具有极好的分布力（见图8-18），在缺乏电流的情况下，所提供的沉积层变化只有3%～12%，在18in×24in板上获得的平整度具有极好的蚀刻性能。

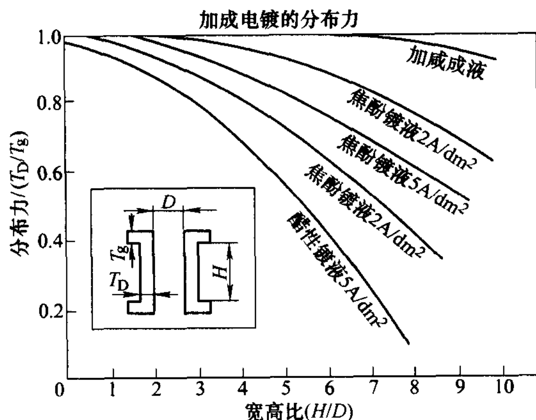


图 8-18 加成电镀过程——宽高比对分布力曲线图（经 Nakahara 同意，1991）

在电镀过程中宽高比越高，镀通孔孔壁厚度的不均匀度就越大，如图8-19所示，而这会导致可靠性变差，不论通孔的深度和直径怎样，化学镀铜都能够沉积出厚度均匀一致的铜层。

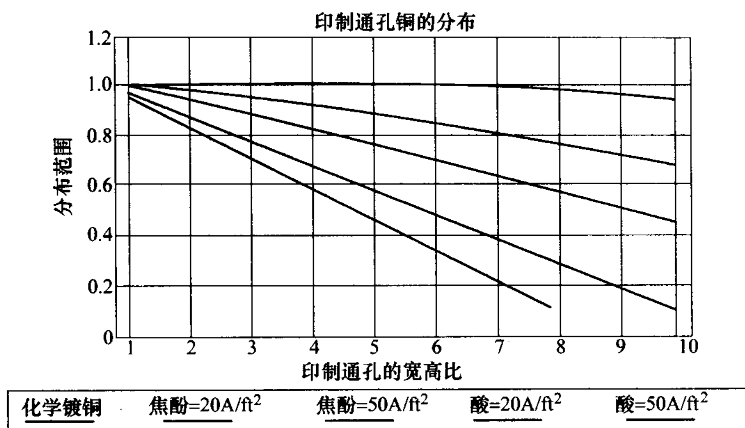


图 8-19 电镀通孔的宽高比越大，孔壁镀铜厚度的不均匀性就越大（经 Patterson 同意，1992）

8.10 防焊膜

防焊膜（阻剂）是一种涂层，用来覆盖或保护未镀锡的铜印制线，使其免受在蚀刻、焊接和电镀过程中可能发生的化学侵蚀和研磨剂的破坏。防焊膜也可以遮蔽掉印制电路板表面的某一区域使其在波峰焊接和回流焊接（气相焊或波峰焊过程）过程中避免焊锡短路。这类防焊膜可以通过丝网印制的方法使用，其厚度约为 0.1mm。另外，防焊膜可以为印制线提供对环境的防护，作为安装距离很近的板卡之间的绝缘屏障，可以防止电路板由于沾上灰尘和指纹等而受到破坏。然而，防焊膜最主要的功能是限制熔融的焊锡流到印制电路板的某些区域或阻止其在某些区域沉积。通孔、焊垫和导线通常不能被防焊膜所覆盖。

防焊膜的功能通常不仅仅只是阻止焊锡在某些区域沉积，人们还希望它能完成许多其他的功能（Tennant，1994）。这些功能包括：

1）减少焊锡桥接和电气短路；

2）在波峰焊接过程中减少焊锡的沉积量以减少电路板的重量和成本；

3）为印制线提供对环境的防护；

4）作为距离很近的印制线的绝缘屏障；

5）防止印制电路板受到灰尘、指纹等的破坏；

6）在波峰焊接过程中减少对焊箱的污染。

8.10.1 阻焊剂的分类

概括的讲阻焊剂可以分为两类：

1）暂时性阻焊剂；

2）永久性阻焊剂。

图8-20给出了各种类型的暂时性和永久性阻焊剂，永久性阻焊剂既可以通过丝网印制也可以通过感光印制的方法使用。丝网印制类型可以进一步分为热固化的和紫外线固化，感光印制的方法可以使用液态膜阻焊剂也可以使用干膜阻焊剂。暂时性阻焊剂可以根据生成阻剂所使用的化学物质来进行分类。

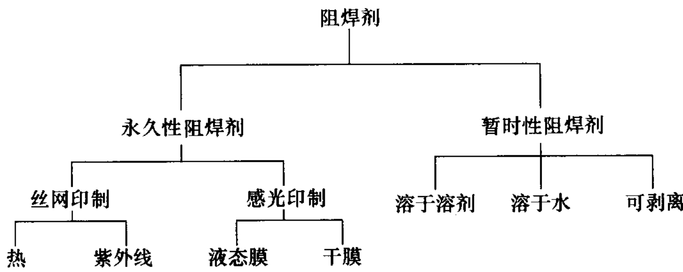


图8-20 焊锡阻焊剂的类型

8.10.1.1 暂时性阻焊剂

这类阻剂或是在波峰焊接操作中临时用来阻止焊锡到达某些孔洞或镀金的板边连接器，或是防止某些孔洞被焊锡所阻塞，进而就可以将这些孔洞保留下来以供后续阶段手工插入元器件。

8.10.1.2 永久性阻焊剂

这类阻剂永久的施用在印制电路板表面，成为印制电路板整体的一部分。随着SMD的引入以及由于电路板上导体的间距变得越来越小，对永久性防焊膜的需求及其化学成分都发生了非常大的变化。随着电路复杂度的不断增加，电路板检验和再加工的成本变得越来越高，防焊膜工艺通过在总体上减少焊锡桥接和电路短路，从某种程度上减少了上述成本，而且，防焊膜还增加了印制电路板工业对环境的保护。

8.10.1.3 防焊膜的应用

防焊膜或阻焊剂在应用时可以采用丝网印制或感光印制的方法，图8-21给出了阻焊剂应用的不同种类。

用于安装通孔引脚元器件的焊垫或连接盘周围的防焊膜在设计时必须与焊垫的四周至少留出0.25mm的空隙，即焊垫外围的其他部分需要被防焊膜所覆盖，如图8-22所示。

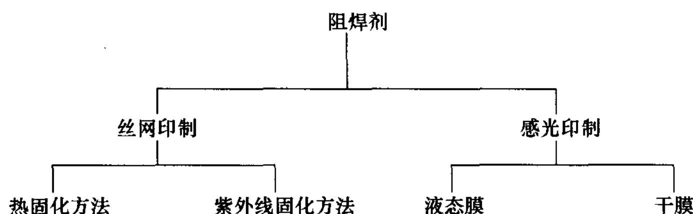


图 8-21　焊锡阻剂的使用方法

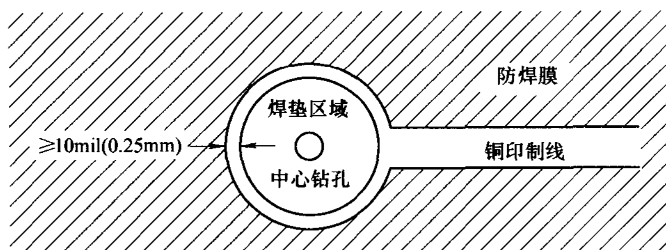


图 8-22　焊接掩膜与引脚元器件焊垫重叠部分的最小尺寸

8.10.2　液态防焊膜

液态或糊剂状的防焊膜是最早使用的一类防焊膜，它在应用时通常由丝网印制的方法来实施。在丝网印制过程中覆膜的均匀性在很大程度上是通过在应用时维持材料浓度的一致性来进行控制的，对于双成分材料，残留溶剂和两种材料成分的标准混合物的质量对于获得和保持规定的掩膜厚度非常重要。在对印制电路板使用防焊膜时，只有对这些参数进行精确的控制，才有可能获得掩膜化学性质和物理性质的均匀一致性。如果所需防焊膜的电气性能需要以可再生的方式获得，则上述参数更为关键。

如果印制电路板上需要使用液态防焊膜的部分已经电镀了金属阻焊剂，则需要进行以下几步操作：

1）剥去金属阻焊剂（锡/锡-铅）；

2）进行水清洗并烘干；

3）机械清洗；

4）水清洗并烘干；

5）微蚀刻以增加粘着性；

6）水清洗并烘干；

7）丝网印制液态光阻剂；

8）紫外线或热固化。

8.10.3 干膜防焊膜

干膜阻焊剂不为液态或糊剂状，它是以一种光敏聚合物膜的形态出现的，这层光敏聚合物膜夹在两层保护层之间，这两层保护层保护中间的感光乳剂膜以防止其在操作过程中受到破坏。应用干膜防焊膜的步骤详述如下：

1. 表面准备工作

在该阶段，将电路板表面上的锡/锡-铅金属阻焊剂进行剥离并用清水清洗电路板表面，并将其彻底烘干，然后对铜表面进行一系列的清洗过程，例如：

1）用热的强碱洗液去油脂；

2）水漂洗；

3）对表面铜层进行1~2.5μm的微蚀刻，这是为了增强干的光敏聚合物膜与表面的粘接性；

4）进行检测以确保完全将锡/锡-铅去除；

5）水漂洗；

6）在10%的硫酸中浸蘸1~2min；

7）水漂洗；

8）研磨清洁（320研磨刷和浮石擦洗）；

9）高压水漂洗并烘干。

用褐色氧化物和黑色氧化物对铜层进行受控氧化是用来增加表面与防焊膜的粘接性，氧化处理过程必须严密控制以使氧化层厚度保持为0.5~1.0μm，如果氧化后的电路板存放时间过久，在压合前表面必须进行彻底的去油脂。

2. 预压合烘干

吸收水气和水分的残留是电路板起泡和分层最常见的几个原因，因此将所有的驻水从印制电路板表面和孔洞中去除就显得特别重要。可以使用高压吹风机将水从电路板的表面和孔洞中予以物理清除，在这一步骤中也可以使用高压真空气刀。

可以通过将电路板在（110±10)℃这一温度下烘烤15~20min以去除电路板吸收的湿气，也可以使用装设有运输带的红外线烤炉在80~120℃这一温度下烘烤30s。不同基材的电路板和不同厚度的电路板需要不同的烘干时间，应当避免过长的烘烤时间和烘烤温度，因为这会增加铜氧化物的生成而导致粘接性变差。

3. 压合

真空压合保证所有的导线完全被光敏聚合物防焊膜所封装，并使电路板没有残存的气泡。

4. 掩膜宽度的选择

干膜宽度的选择应当根据制程板的宽度而定，干膜的宽度不应当超过制程板宽度 10mm 以上，以避免边缘修整损耗。压合时可以同时压合两面也可以先压合完一面再压合另一面，这主要根据所使用层压机的类型和干膜的类型而确定。

5. 压合后的维持时间

压合和曝光之间的维持时间应当进行仔细的控制以获得最佳的效果。压合刚刚完成时，所需的曝光能量较低，它随着维持时间的增长而迅速增加，并逐渐稳定到一个常数值。因此，压合后的维持时间应当保持一个常数值以避免曝光时间剧烈的变化。

6. 曝光（底片）

通常，光敏聚合物防焊膜为负性工作，因此它需要正性的底片（焊垫区域不透明）以便曝光。由于所需的能量较高，故底片必须具有很高的密度，其密度最大值 D_{max}最小也要大于 4 以避免焊垫区域产生防焊膜，空白区域的密度最小值 D_{min}必须小于 0. 15。由于掩膜的密度随着使用而不断改变，故底片必须周期性的进行检查以保证 D_{max}最小也要大于 4。

通常使用 7mil 的单面药膜偶氮棕片可以获得最佳效果，对于不需要透过焊垫对齐的对位系统而言，可以使用卤化银掩膜，将其有药膜的一面与电路板紧紧的贴在一起以获得最佳的曝光效果和边缘逼真齐直度。底片不透明的焊垫区域最小应为 0. 1 ~ 0. 15mm，它应该比印制电路板上焊垫的直径略大。

通过使用 Stouffer 21 阶曝光尺[⊖]，可确定和监控曝光时间以及随后的聚合度。为了确定正确的曝光值，维持时间和显像条件必须是相容的。使用的 Stouffer 21 阶曝光尺将超过 50% 的阻剂覆盖定义为最后一个阶段。需要一定的相容维持时间以使聚合过程完成并进入稳定状态。

7. 显像

显像过程是将未曝光的（未聚合的）阻焊剂从印制电路板表面冲掉，某一类特定的光敏聚合物的显像时间取决于所采用的化学物质，正确的显像时间通过控制未曝光的阻剂可以从印制电路板表面完全冲掉的时间点而确定，需要将焊接阻剂从电路板的焊垫和孔洞中完全去除以获得良好的焊接性。常用的化学物质为：水溶液和显影剂。

在水溶液显影中，通常将稀释的碳酸钠溶液加入到 99% 的纯水中，其使用温度为 45℃，使用该溶液后，印制电路板进行完全显像时所经历过的冲刷路程，以占显像室长度的 40% ~ 60% 之间为宜，使用显影剂时，采用 1-1-1 三氯乙

⊖ 美国 Stouffer 21 阶曝光尺是印制电路板公司在生产中，为了对液态感光电路板油墨、液态感光防焊油墨进行较为准确曝光控制的一种必备物品，以保证电路板的品质。——译者注

烷[⊖]，其显像点应当设置在显像室全部长度的25%处。

8. 烘干

为了获得令人满意的固化效果，板子在显像后必须进行彻底的烘干，通过使用热风气刀将电路板在90℃时加热15分钟，就可以将电路板上的阻焊剂和基材在显像和清洗阶段所吸收的湿气予以完全的去除。

9. 固化

在波峰焊接和气相焊接过程中为达到最佳的焊接性能并防止掩膜起翘，光敏聚合物阻剂必须进行适当的固化。

光敏聚合物防焊膜的紫外线（UV）固化可以采用传统的使用汞气灯的固化设备来完成，通过控制汞气灯的密度和传送带的速度来获得所需的能量水平，最好在一次通过中吸收足够的能量使电路板的一面完全固化。紫外线汞气灯应当使用200W/in的高压水银蒸气灯，由于紫外线灯发出的热量在固化过程中构成整体所必需的一部分，所以不推荐使用“凉”的紫外线单元来减少到达电路板的热量。在紫外线固化过程中电路板表面的温度小于105℃常常会导致不良的固化效果，同时还要注意在紫外线固化过程中不能过度的加热电路板，其典型的温度应当在110～140℃之间，过度的加热会导致光敏聚合物变脆，并在表面出现起泡现象。

在热固化过程中，用于烘烤电路板的烤炉的温度应当在整个烘箱室内都能进行完全均匀的温度控制，这些烤炉不能挪作他用以防污染防焊膜。

不能使用没有新鲜空气入口的烤炉，这是因为热空气可能会冷凝到电路板表面而降低焊接性，另外，如果炉内的空气不被稀释，这些热空气会达到可能发生爆炸的危险的温度。为了烤炉能够安全的工作，应当备有恒温控制计时器和温度记录仪，同时还需要排风扇来使热量到达整个炉室，炉室中还应当配备带有吹风机的排气管。

在一定受控条件下制造的干膜防焊膜厚度均匀，应用该掩膜时使用高压层压机，以保证整个制程板区域覆膜均匀一致，这种方法也可以使不同批次和炉次的制程板覆膜保持均匀一致。

丝网印制和帘式淋涂工艺均是单面处理系统，换句话说，防焊膜的使用每次只能进行一面操作，在印制另一面之前必须将电路板烘干以去除油墨胶粘结剂，这使得处理第二面时会同样花费很长的时间。使用真空层压机，可以同时在板子的两面使用干膜阻焊剂。

⊖ 化学分子式为 $C_2H_3Cl_3$，也称甲基氯仿三氯乙烷。——译者注

8.10.4 分辨率

感光防焊膜使下述事实成为可能，即使防焊膜与焊垫非常靠近但不发生溢流和胶渣问题，而传统的丝网印制阻焊剂常常会发生这些问题。

感光系统在曝光时采用正性覆膜底片，与干膜防焊膜的情况类似，也用紫外线照射。在干膜系统中，可以通过从焊垫上去除防焊膜油墨而可靠的获得。

液态感光防焊绿漆提供非常高的分辨率，其覆膜厚度只有40μm左右，而对于干膜防焊膜来讲，其覆膜厚度最小也能达到50μm，在某些称为厚铜设计的电路板上还会更厚。但液态感光防焊绿漆（LPISM）的分解需要更长的曝光时间，这就使得焊垫周围必须留有更大的缓冲区以防掩膜侵蚀焊垫，这一问题在传统的丝网印制防焊膜中发生的更加频繁，因为防焊膜与焊垫的对准度不可能是100%的，由于丝网本身不可克服的下限而导致防焊膜侵蚀焊垫。

8.10.5 封装

所有印制电路板的使用都希望电路图形被防焊膜完全的封装，当电路的密度越来越大时更是如此。规范要求印制电路板上任何一点导电图形上的防焊膜的厚度最小也要达到25μm，电路板上封装的程度也决定了电路板的电气绝缘等级以及板子对环境侵袭的抵御能力。

对于丝网印制油墨来讲，封装的等级直接与丝网的选择、油墨的粘度、印制的温度和速度有关，如果导体的高度有变化，封装的程度也会发生变化。使用的液态防焊膜可能显示出强烈的有方向性的涂层棱线，但对于预先成型的干膜来讲，假如电路板上导体的高度不超过干膜的厚度，所获得的封装在整个板面上将是均匀一致的，使用干膜可以在整个印制电路板表面上获得厚度最小为25μm的封装。

人们希望防焊膜材料（液态或干膜）将其下面的电路元器件完全封装，以保护其免受操作环境中各种侵蚀的影响。使用干膜防焊膜时为了达到这一目的，所选用的覆膜在压合过程中必须能够布满电路上的所有焊垫和印制线，一个凭经验得来的好方法就是所选用覆膜的厚度至少应该等于被覆盖铜层厚度的两倍。在实际工作中，如果要覆盖厚度为1oz（厚度为35μm）的铜箔基板，所使用的掩膜的厚度至少应为厚度为0.0013in的铜层厚度的两倍，在这类应用中，最常使用的就是厚度为3mil（0.003in）的掩膜。如果不遵守这一简单的规则可能会导致在焊垫或印制线边缘出现细小的毛细裂缝，这些裂缝的尺寸正好发生毛细抽吸，将波峰焊接或手工焊接所使用的腐蚀性焊剂保留在缝隙中，最终可能会导致电路板的制作失败。

如果掩膜下电镀层的厚度没有进行可靠的控制，不管采用什么类型的防焊

膜，使用什么样的掩膜应用方法，都不能确保封装厚度的均匀一致性。

8.10.6 不同阻焊剂厚度的表面地形㊀

采用液态防焊膜与干膜防焊膜所得到的表面地形有显著的不同。在液态系统中，将少量的液体施用到电路板上，由于液体的流质性能，这些液体趋于流向基材的低洼处，这样就在导体表面留下一层薄膜。对于干膜防焊膜，导体的厚度本身嵌入到防焊膜下面，因此实际上提供了一个相对平的表面。

8.10.7 对元器件放置的帮助

防焊膜可以帮助某些SMD定位，焊锡的表面张力对于某些SMD的自动排列是有益的。采用较厚的干膜可以很容易的获得对SMD定位排列的帮助，但采用液态防焊膜油墨就很难获得这一效果了，需要多次覆膜使电路板上沉积层达到100μm才可以，但这会导致焊垫区域出现掩膜胶渣。

在安装焊垫之间应用厚膜阻剂对SMD是有好处的，因为如果元器件用胶固定在适当的位置后，元器件基底与印制电路板之间的孔隙不应超过100μm。使用厚的干膜防焊膜就可以满足这一需求，而且还能提供了一个平面以便应用胶封，如图8-23所示。

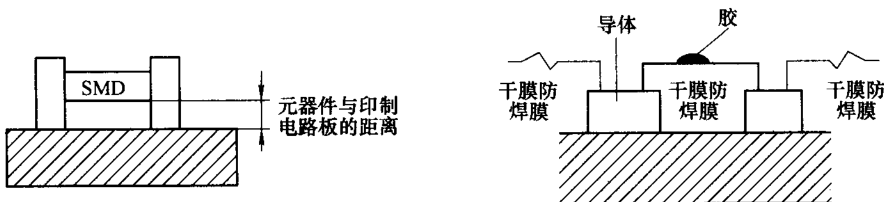


图8-23 SMD的放置

在气相焊接操作过程中，某些类型的扁平元器件会出现一端翘起的“墓碑效应”，使用更厚的干膜会使这一问题更加恶化。在这种情况下，就需要使用较薄的防焊膜，此时就不选用厚度为100μm的干膜，而使用50μm厚的干膜。

8.10.8 防焊膜的可靠性

防焊膜的可靠性有赖于覆膜的完整性和完全的掩膜封装，一个最小值为25μm的导体覆膜就可以提供足够的保护以防止在操作和组装阶段产生机械破

㊀ 表面地形指空板或组件外表的高低起伏地形，有如大地的外表，而同样地表的侧视图则称为棱线图。——译者注

坏。长期的电气可靠性依赖于所使用防焊膜材料的电气性能，采用干膜防焊膜对电路进行的封装膜所提供的介电强度超过2kV。

对于电路板的液态防焊膜，其厚度小于25μm，因此它常常有更多的针孔和裂隙，与干膜封装的电路板相比，其绝缘性能较差。

8.10.9 焊接与清洗

不同的防焊膜系统都有其自身的清洗系统，焊垫及其周围清洁的程度将会影响助焊剂的流动，这又会控制焊垫的粘锡程度，最终决定了焊接点本身。

8.10.10 通孔掩蔽法

随着SMD的应用，通孔的尺寸变得越来越小，当使用液态掩膜的时候，不能可靠的对通孔进行掩蔽，另外，由于许多防焊膜都会堵塞通孔，在曝光过程中溶解这些软的被烘烤过的覆膜非常困难，故对这些通孔进行可靠的焊锡填充就难以保证，因此液态防焊膜含有SMD的电路板通孔掩蔽工艺不相兼容。然而，在有通孔出现的区域如果采用感光的干膜防焊膜，甚至采用一个厚度为50μm的耐用的保护性覆膜，就可以对通孔进行可靠的掩蔽，如图8-24所示，而且这些通孔还可以经得起热风整平工艺。

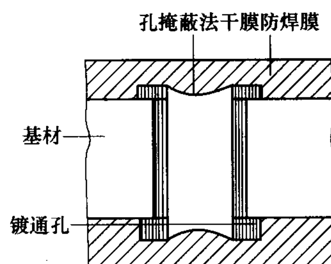


图8-24 通孔掩蔽法横截面图

从为湿气和助焊剂的渗透提供环境和电气阻隔的角度来看，通孔掩蔽也是值得的，它使得在焊接过程中吹孔的数量减少，使桥接和芯吸现象发生的概率更小。通孔的掩蔽还能为裸板测试提供巨大的好处，未受保护的通孔和未填充的通孔不允许引入真空进行测试，而这在此类测试设备中是保证电气连接的通用技术。

8.10.11 裸铜板上的防焊膜

这是主要的阻焊剂应用技术，SMOBC表示“裸铜板上的防焊膜”。传统的在防焊膜下进行锡-铅电镀的主要的缺点之一是：在波峰焊接和红外回流焊接以及气相焊接过程中，防焊膜发生起泡现象。

防焊膜下流动的熔融的锡-铅金属会产生强大的液体压力，这些金属液体一路向前，会冲破防焊膜，严重的降低印制电路板的可靠性，形成的破孔作为液体的导管和通道，使过多的助焊剂流到基材上。

裸铜板上的防焊膜这一工艺消除了在防焊膜下面的导体上进行锡铅沉积，克服了上述问题。一个全板镀铜的印制电路板在掩蔽和蚀刻工艺中常常被使用，如图8-25所示。在此例中，印制电路板最初进行钻孔，将通孔采用传统的化学

镀铜工艺进行金属化，接着，通过全板电镀待铜层沉积到所需的厚度，然后将干膜压合到上面并使用负性底片进行曝光，曝光区域的光阻剂发生聚合，在通孔上形成掩蔽层。此时的电路板直接用于蚀刻，在通孔和导体区域周围不需要铜层的地方将铜层予以去除，因此只留下孔洞和导电图形。将焊垫区域的光阻剂和防焊膜剥离，焊垫区域暴露出铜层，此时导体印制线上的铜层仍然覆盖着光阻剂。通过热风整平工艺将暴露的铜层区域镀上一层锡-铅合金以防止其逐渐被锈蚀。

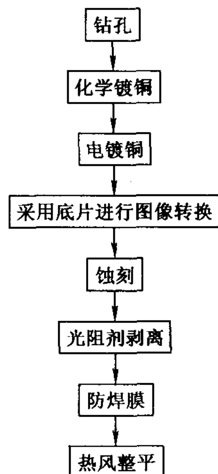


图8-25 通过掩蔽工艺对裸铜板进行焊接掩膜的工艺顺序

另一个选择是对印制电路板进行传统的图形电镀工艺，而后将金属蚀刻阻剂剥离，再对印制电路板使用防焊膜。此例中同样为防止焊垫被锈蚀而对其应用热风整平工艺，以此来增加印制电路板的焊接性。

8.11 护形涂层

护形涂层用来加强印制电路板组装的性能和可靠性，使其能够在像水下、航天和军事应用等恶劣的环境下应用。电子消费产品的制造商越来越多的使用护形涂层来作为提高产品可靠性的一种经济的方法。

当没有护形涂层的印制电路组装板暴露在潮湿的空气中时，其表面上会形成一层厚厚的水分子膜，减小了电路板的表面绝缘电阻（SIR）。表面绝缘电阻越低，电信号的传输性能恶化的就越厉害，其典型后果是会引起串话，电泄漏和传输的间断，进而可能导致信号永久性的中断，即短路。没有护形涂层的印制电路板上的湿气膜还为金属生长和锈蚀提供了有利条件，最终反过来会影响绝缘强度和高频信号，落在组装板上的灰尘、污垢和其他环境污染物不断吸收湿气，进而扩大其负面影响，像金属碎片等导电粒子还会造成电气桥接。

护形涂层是一层包在印制电路组装板周围的塑料薄膜，这层薄膜的厚度为0.005in，它将灰尘和环境污染物密封在电路板外面。当然，护形涂层也可能将预清洗过程中没有去除的污染物密封在里面，因此在应用护形涂层前对电路板表面进行清洗非常重要。

护形涂层的作用如下：

1）保护电路远离极端环境，避免其受到湿气、菌类、灰尘以及锈蚀的影响；

2）防止电路板在制作、组装和使用过程中受到损害，减少元器件上的机械应力并保护其免受热振荡的影响；

3）减少使用过程中的磨损；

4）由于护形涂层增加了导体间的绝缘强度，故强化了电路板的性能并允许更大的元器件密度。

8.11.1 护形涂层的材料

许多材料都可以用于制作护形涂层，每种材料都有其自身的性能和应用领域，不同类型的护形涂层其主要性能概述如下：

1）丙烯酸护形涂层：它应用方便，在室温下数分钟就可以固化，具有令人满意的电气性能和物理性能，抗菌且不收缩。这类敷层有较长的贮存期，不缩水，在固化过程中不放热或放热很少，这就避免了对热敏元器件的破坏。它主要的缺点是对溶剂敏感，但这一特点使维修较方便。

2）环氧树脂护形涂层：它通常作为双成分系统的化合物，具有防潮性能、抗磨损性能和耐化学性。环氧树脂护形涂层在加工时很难通过化学的方法予以去除，这是因为任何清除设备在去除涂层的同时均会溶解电路板上的环氧树脂覆膜元器件，甚至会破坏环氧树脂纤维玻璃印制电路板本身，因此元器件的更换需要用小刀或焊接烙铁来穿透环氧树脂护形涂层。

3）聚氨酯覆层：它既可以用于单成分系统也可以用于双成分系统，具有极好的防潮性能和耐化学性，在很长一段时间内都具有极佳的绝缘性能。聚氨酯覆层很容易被焊接烙铁烧透，因此元器件的替换相对容易。

清洗是应用任何护形涂层之前必不可少的一个重要步骤，尤其是聚氨酯对湿气更加敏感，它在潮湿的情况下会起泡，最终导致电路失效。从形式上来讲，聚氨酯在应用时应更加小心，应对涂层和固化环境进行仔细控制。

4）硅树脂护形涂层：该涂层特别适用于200℃左右的高温环境，它能够提供极好的防潮和抗磨损性能以及良好的耐热性，这使得硅树脂护形涂层更加适用于含有高散热元器件的印制电路板。

各种护形涂层典型的电气性能和热性能性能如表8-4所示（Waryold和Lawrence，1991）。

表8-4　护形涂层的性能

电　性　能	丙烯酸	环氧材料	硅树脂	聚氨酯
介电强度(短期,23℃,0.001in时)/(V/mil)	3500	2200	2000	3500
表面电阻率(23℃,含50%铑时)/(Ω/cm)	10^{14}	10^{13}	10^{13}	10^{14}
介电常数(23℃,1MHz时)	2.2~3.2	3.3~4.0	2.0~2.7	4.2~5.2

（续）

热 性 能	丙烯酸	环氧材料	硅树脂	聚氨酯
耐热度(持续时)/℃	125	125	200	125
热膨胀线性系数/[(μm·℃)/in][①]	50~90	40~80	220~290	100~200
热导系数/[10^4cal/(cm·s·℃)][②]	4~5	4~5	3.5~8	4~5

① 本书此处原文有误,因"热膨胀线性系数"是指温度每升高1℃时,单位长度的某一物质的长度变化量,故"(μm·℃)/in"应改为"μm/(in·℃)"。——译者注

② 导热系数,即热导率,单位为"W/(m·k)"。1cal/(cm·s·k)=418.68W/(m·k)。——译者注

8.11.2 护形涂层的使用方法

护形涂层应用的基本方法有四种，讨论如下。(Waryold 等，1998)

1. 浸蘸：该方法中，将掩膜后的组装板浸蘸到盛有液态涂层材料的储液槽中再取出即可，该过程要确保涂层的均匀覆盖与平整。浸蘸和取出的速率是需要进行控制的一个重要参数，以便使粘性的液体物质完全填充到组装板的每一个孔洞中。典型的浸蘸速率为2~12in/min，以保证护形涂层将元器件周围的空气完全排除。

当使用浸蘸的方法使用护形涂层时，液态物质中溶剂蒸发的速度很快，这导致槽液的粘度迅速增加，基于这一原因，对槽液进行连续不断的监控以维持合适的粘度就非常重要了。

2. 喷洒：喷洒是应用护形涂层最常用和效率最高的方法，采用适当的稀释溶剂、适度的喷嘴压力和模式，就可以获得稳定坚固的涂层。喷洒可以采用人工操作也可以采用将计算机控制系统集成在现存的波峰焊和清洗生产线上使用自动方式进行。喷洒这种方法的主要缺陷是元器件的下面或被元器件遮挡的部分涂层很薄或不能施加涂层。

涂层在组装板上喷洒时应当使用清洁、干燥的空气以所需的最小压力进行喷洒，从而获得最好的雾化效果，喷洒时应当使喷枪与组装板保持45°角且来回往复，每次过后将组装板旋转90°。

3. 刷敷：它采用人工操作，这是应用护形涂层效率最低的一种方法，很难获得均匀且一致的涂层，该方法仅适用于对少量的印制电路板进行涂敷。

每一种涂敷方法都有其优点和缺陷，采用浸蘸和喷洒相组合的方法就比单独采用一种方法效果要好。

8.11.3 护形涂层的标准

有些商业应用涂层在制造时要求非常严格，但制造商并不保证其符合某种特别的规范，护形涂层的军事应用规范是 Mil-I-46058C，但该规范已经废弃不再

使用，新的规范是 IPC-CC-830，对于元器件来讲符合 UL 要求的涂层也可以使用。

8.12 几个常用标准

1）IPC-4552：印制电路板化学镀镍浸金镀（ENIG）的规范。为印制电路板使用化学镀镍浸金镀作为表面末道漆制定的规范需求，包括根据执行标准确定所需的沉积厚度。

2）IPC-HDBK-830：护形涂层设计、选择和应用的指导方针。护形涂层工业实践经验的一个汇编，以帮助护形涂层的设计者和使用者作出正确的选择。

3）IPC-SM-840C：永久性防焊膜的性能和限制条件，包括附录Ⅰ。包含了液态和干膜防焊膜所需的质量性能和限制条件。

4）IPC-SM-839：防焊膜使用前后应用清洗步骤的指导手册。包含了与防焊膜应用相关的清洗步骤的所有方面，包括电路板在预装配过程中板子的预备、过程控制和清洗维护。

第9章 蚀刻技术

蚀刻技术是印制电路板负性制造过程中主要的化学步骤之一，通过这一过程将多余的铜箔剔除而只保留电路板所需要的，这样就形成了最后的铜箔图样。那些没有被保护的铜箔，通过蚀刻剔除掉。通常用于蚀刻的几种方法有：

1）化学蚀刻或化学加工；

2）电化蚀刻或化学铣切；

3）机械蚀刻（通过铣削）。

9.1 蚀刻的化学溶液

使用最普遍的几种蚀刻剂是：

1）氯化铁；

2）过硫酸铵；

3）铬酸；

4）氯化铜；

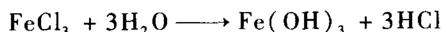
5）碱性氨。

以下几节将对这几种蚀刻剂的化学性能和蚀刻方法加以详细介绍。

9.1.1 氯化铁

在印制电路板制造工业中，氯化铁蚀刻剂被广泛地应用于印制和蚀刻过程中。氯化铁具有很高的蚀刻速度和溶解铜的能力。它应用于网印油墨、光阻（干膜和湿膜）和镀金板。由于氯化铁蚀刻剂与锡互不相融，因而它不适用于镀锡或锡-铅的印制电路板。

氯化铁蚀刻剂中氯化铁的含量占溶液的28%～42%。这种溶液的比重是1.353～1.402。它提供了非常宽的浓度范围，但是应用最广泛的是35%的氯化铁溶液。氯化铁溶液发生水解反应生成游离的酸，其水解反应的公式如下：



$$FeCl_3 + 3H_2O \longrightarrow Fe(OH)_3 + 3HCl$$

为了防止生成不溶于水的氢氧化铁和过量的盐酸，通常在加入时需超过常量的5%，以防止氯化铁在水中如上面的公式那样自动水解。商品配方中也要包含润湿剂和消泡剂。

在蚀刻的开始阶段，由于氯化铁的浓度高，所以溶解的铜的浓度也很高。

随着时间的增加，溶液中的氯化铁被逐渐地消耗掉，一段时间之后，溶液必须被倒掉而更换新的溶液。当蚀刻剂垂直喷洒在铜表面，并且印制电路板来回移动时，铜的溶解会更好。铜的溶解速度取决于氯化铁的浓度、温度和搅动速度。

氯化铁可能是最早和使用最普遍的蚀刻剂，它通常是以结晶的形式存在的。这种结晶体在水中电离，达到理想的溶液浓度。通常每升水中溶解500g氯化铁。

1. 化学性质

铜被+3价铁离子氧化，生成氯化亚铜（CuCl）（绿色），如方程（1）所示。CuCl随后又被氧化为氯化铜（$CuCl_2$），如方程（2）所示



$$Cu + FeCl_3 \longrightarrow FeCl_2 + CuCl \quad (1)$$



$$FeCl_3 + CuCl \longrightarrow FeCl_2 + CuCl_2 \quad (2)$$



$$CuCl_2 + Cu \longrightarrow 2CuCl \quad (3)$$

事实上，当溶液中溶解的铜达到8oz/USgal[㊀]（60g/l）以上时，蚀刻时间会比理想的长。然而，如果能够尽可能地延长蚀刻时间，氯化铁可以溶解的铜可达到120g/l。为了提高铜的溶解能力并稍微缩短蚀刻时间，当铜达到80g/l时，加入盐酸（为蚀刻剂量的10%）。酸可以帮助控制过多的沉淀生成。图9-1给出了蚀刻所需时间与蚀刻液中铜含量的关系图。

为了检测结果，了解铜在蚀刻过程中的确切浓度，可以进行这样一个化学分析：将溶液的颜色与已知铜含量的溶液颜色进行比较，通过这种比色的方法观察溶液颜色的变化来测量铜的含量，这种方法虽然不太精确但是很实用。在蚀刻温度为20～45℃时，每蚀刻1kg铜平均要消耗5.1kg氯化铁。

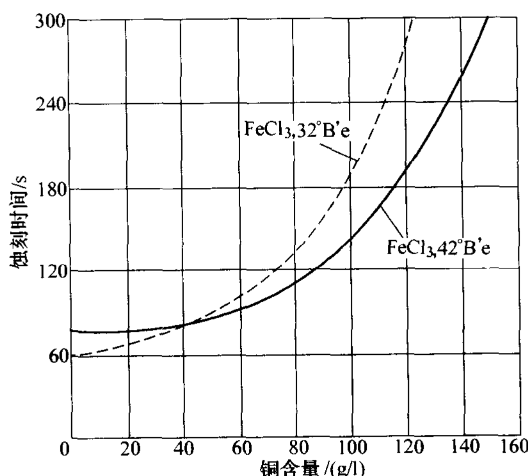


图9-1　43℃时使用氯化铁喷洒蚀刻35μm的铜需要的蚀刻时间

遗憾的是，氯化铁在自然条件下具有腐蚀性，会形成黑斑点，而且很难回收再利用。如果用锡钎焊或锡作为保护膜，就会起到很好的防腐作用。

2. $FeCl_3$ 蚀刻溶液的组成

㊀ 1USgal≈3.78541dm^3。——编辑注

1) $FeCl_3$ →450～500g/l[⊖]
2) 比重 →1.35～1.4
3) 铜溶解度 →120g/l
4) 盐酸（HCl） →10ml/l
5) 温度 →20～45℃
6) 消泡剂 →3ml/l

3. 过程控制与再生

氯化铁溶液几乎不可能再生，而且即使再生其花费也是非常昂贵的。只能根据需要从氯化铁中把氯化铜分离出来。

将氯气（Cl_2）通入蚀刻后的 $FeCl_3$ 蚀刻剂（见图9-2）中，就可以把铜从溶液中还原析出。加入氯化铵，并冷却到一定的温度，就可以结晶出氯化双盐（$CuCl_2 \cdot 2NH_4Cl \cdot H_2O$）和氯化铵的混合物。

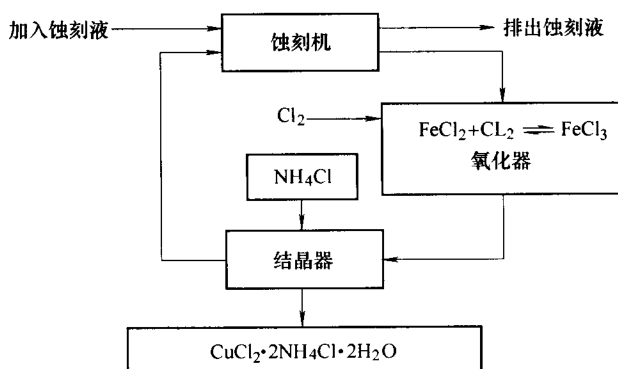


图9-2 氯化铁的闭合循环再生以及再结晶的还原方法

9.1.2 过氧化氢-硫酸

这种广泛的应用在铜表面制剂的方法也称为微蚀。它使有机物和金属阻膜相兼容，具有稳定的蚀刻速率和整齐的侧边线条。由于其很容易补充，采用闭路循环铜还原系统，并且只需简单的废物处理，所以被广泛应用。

1. 化学性质

过氧化氢是一种强氧化剂。它能够氧化和溶解金属铜。硫酸溶解铜，使铜在溶液中以硫酸铜的形式存在。同时硫酸铜有助于使蚀刻和还原速度达到稳定，蚀刻反应方程为



$$Cu + H_2O_2 + H_2SO_4 \longrightarrow CuSO_4 + 2H_2O$$

⊖ 本书原文中"lt"似有误，应为"lit"，即liter（升）。——译者注

2. 蚀刻剂的组成条件

1） H_2SO_4（96%）	硫酸	100ml/l
2） H_2O_2	过氧化氢	70ml/l
3） $CuSO_4$	硫酸铜	60g/l
4） 温度		30～40℃

3. 过程控制与再生

过氧化氢/硫酸蚀刻剂可用于浸入蚀刻，也可用于喷洒蚀刻。在闭环系统中，随着副产品的生成和硫酸铜的再生来达到蚀刻剂中物质的平衡从而控制整个蚀刻过程。这种系统要求蚀刻剂能够在蚀刻槽中循环流通，通过化学对蚀刻剂控制补充。在这个过程中常常会遇到过热、蚀刻剂中物质的平衡、蚀刻剂污染以及处理过氧化浓缩溶液时的安全等一系列问题。

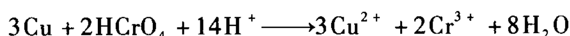
9.1.3 铬-硫酸

由于铬酸与硫酸混合具有很强的氧化能力，因此很适合用作各种金属阻膜，如锡、锡-铅、金、乙烯漆和干或湿光阻。

这种蚀刻剂速度不稳定，但是其优点是成本低。然而，由于它很难回收且毒性很高、污染环境、对人身体有害，现在已经很少应用了。建议一般情况下不要使用。

1. 化学性质

铬酸与铜之间的反应是



$$3Cu + 2HCrO_4 + 14H^+ \longrightarrow 3Cu^{2+} + 2Cr^{3+} + 8H_2O$$

在这个过程中，铜的蚀刻速度不是很高，但是可通过添加硫酸钠来提高蚀刻速度，也可以通过升高温度和搅动溶液来提高蚀刻速度。

2. 蚀刻剂的组成和反应条件

1） 铬酸	200～240g/l
2） 硫酸	60～65ml/l
3） 硫酸钠	40～45g/l（添加剂）
4） 温度	20～30℃

3. 过程控制与再生

这种蚀刻剂一般用于浸入蚀刻而不用于喷洒蚀刻。蚀刻速度通过比色标法的方法控制，同时密度通过液体比重计测定。由于它具有腐蚀性，因此通常不再回收利用，一般当作废品处理掉。例如，铬酸是一种非常强的氧化剂，如果没有采用安全操作、进行足够的通风，则气体会损坏衣服、塑料和很多金属。同样，对剩余铬酸的处理也是一个严肃的问题，这些都需要按照污染控制规范去处理。

9.1.4 氯化铜

氯化铜为制作大规模丝印-蚀刻类型的印制电路板提供了一个非常经济的蚀刻方法。从污染的角度考虑，它的优势在于易于回收和处理、产量高、回收快。它溶解铜的能力也很强，可以达到150g/l。

从性能上讲，氯化铜比氯化铁好，因为它不像氯化铁那样生成残渣。基本上，溶液中含有氯化铜 150～400g。溶液中通常需要加入一些 HCl，并加入大量的 NaCl 或 NH_4Cl（达到饱和状态）。

氯化铜蚀刻剂常应用于生产精细布线的多层印制电路板（内层）和丝印-蚀刻类型的印制电路板。它与网印油墨、干膜、湿膜、光阻和镀金这些阻膜是相兼容的，但与锡或锡-铅阻膜不兼容。

1. 化学性质

$CuCl_2$ 溶液与 Cu 的所有反应如下



$$Cu + CuCl_2 \longrightarrow 2CuCl \quad (4)$$

氯化亚铜接着又被空气中的氧气氧化，重新生成具有蚀刻功能的 $CuCl_2$。



$$2CuCl + 2HCl + 1/2O_2 \longrightarrow 2CuCl_2 + H_2O \quad (5)$$

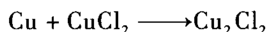
在这个过程中，要不断地排放掉少量的溶液，以使溶液中铜的浓度保持恒定。溶液中包含 HCl、NaCl 或 NHCl 和 NH_4OH。

2. 蚀刻剂的组成

1）$CuCl_2$　200g/l
2）HCl　200ml/l
3）H_2O　770ml/l
4）开始时 Cu 的浓度　40g/l
5）过氧化氢　30ml/l（可选的）
6）温度　30～40℃

3. 过程控制与再生

方程（6）给出的方法通常不用于回收，因为氧气与酸反应非常缓慢，而且在高温溶液中氧气的溶解度只能达到 $4 \sim 8 \times 10^{-4}\%$。另一方面，直接氯化是一种更好的回收氯化铜蚀刻剂的方法，因为其成本低、速率高，而且铜的还原效率也高。回收的化学方程式为



$$Cu + CuCl_2 \longrightarrow Cu_2Cl_2$$

氯化作用的结果是

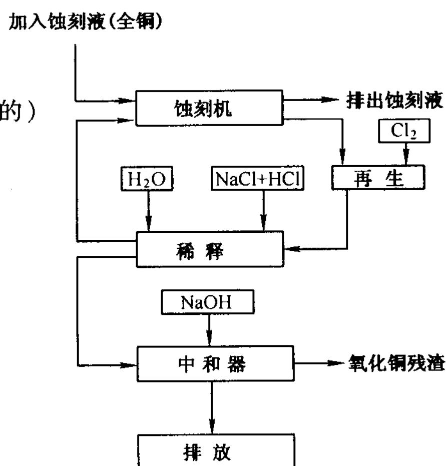
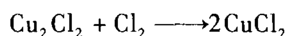


图 9-3 $CuCl_2$ 的氯气再生过程
（经 Coombs 同意，1988）



$$Cu_2Cl_2 + Cl_2 \longrightarrow 2CuCl_2$$

连续反应的过程如图9-3所示。Cl_2、HCl和NaCl根据需要自动加入溶液中。各种各样控制过程的装置例如比色计、水平传感器和温度控制计和控制装备、蚀刻速度计等，这些装置都使反应达到最佳状态。

以上的回收过程成本低且回收率高，蚀刻后的溶液由于铜含量高也很容易再利用。如果蚀刻过程中参量没有掌握好，可能会出现一些问题。最重要的问题是反应速度慢，这通常是由于温度太低、不适当的搅动或缺乏对溶液的控制造成的。如果酸的浓度过低也会形成残渣。通过提高温度和增加酸的含量可以使光阻降低。

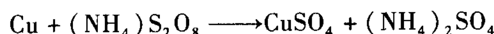
9.1.5　过硫酸铵

过硫酸铵没有氯化铁那些缺点，因此经常被用作蚀刻剂。它也经常用作无电镀板的表面处理和多层印制电路板在覆氧化膜前的电镀。不幸的是，过硫酸铵同时也是强氧化剂，它在溶液中很不稳定，会分解出过氧化氢、氧气和过氧化硫酸。后者是一种慢氧化剂，在室温下蚀刻速度很慢。因此当它与其他氯化物反应时可以增加HgCl作催化剂来加快反应速度。它与板子上许多阻膜兼容，包括焊锡、锡、锡-铅、网印和光阻，但镀金板除外。

包含有硫酸的过硫酸铵，在氯化银（AgCl）的催化作用下具有很高的蚀刻因数，且通过闭路循环系统容易回收。但是过硫酸铵要比其他的蚀刻剂消耗大，因此实际应用率较低。

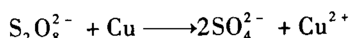
1. 化学性质

过硫酸铵（或钾）与过硫酸（$H_2S_2O_8$）混合而得到稳定的过硫酸盐。这种过硫酸离子（$S_2O_8^{2-}$）溶于水，具有很强的氧化能力。在铜蚀刻过程中，过硫酸离子与金属铜的主要反应是



$$Cu + (NH_4)S_2O_8 \longrightarrow CuSO_4 + (NH_4)_2SO_4$$

在这一过程中，一个过硫酸离子（$S_2O_8^{2-}$）生成两个硫酸根离子（SO_4^{2-}），同时SO_4^{2-}将一个铜原子氧化为铜离子



$$S_2O_8^{2-} + Cu \longrightarrow 2SO_4^{2-} + Cu^{2+}$$

如果锡或锡-铅有保护膜，印制电路板使用过硫酸铵蚀刻，这样的铜蚀刻不完整并且会变黑，通过添加1%的磷酸可将锡钎焊除去。

2. 蚀刻剂的构成和条件

1）过硫酸铵



2）$(NH_4)_2S_2O_8$　　→200g/l



3）H_2SO_4　　→10ml/l



4）H_2Cl_2　　→0.5ml/l或$5\times10^{-4}\%$

5）温度 →30～40℃

3. 过程控制和再生

过硫酸铵可以用喷洒蚀刻和浸入蚀刻两种方式操作，整个过程由色度测量控制。冷却线圈用于保证蚀刻时温度恒定且防止溢出，其最佳温度是45℃。

通常，在38～55℃时，蚀刻剂溶解铜的能力大约为7oz/gal。超过5oz/gal的铜时，溶液的温度应该维持在55℃以防止盐结晶。温度为48℃时，铜的溶解度保持在7oz/gal，此时的蚀刻率为0.00027in/min。

反应后的蚀刻剂主要包括硫酸铵或钠与硫酸铜，其pH值大约为2，不能直接把这些溶液排放到下水道。因此，应首先把溶解中的铜滤出，紧接着剩下的溶液必须稀释中和后再排放。

总的来说，在过硫酸铵、钠和钾中加入催化剂，都能用于印制电路板的蚀刻生产。然而，对于连续再生系统则更多地使用过硫酸铵。过硫酸盐受欢迎是因为它的消耗低，而且蚀刻铜的能力强、速度快。

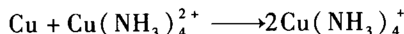
9.1.6 碱性氨/氯化铵

碱性氨蚀刻工序不但可以成批进行也可以在传输中喷洒进行，适于金属和有机物阻膜。它的优点在于侧蚀小、溶解度高和蚀刻速度快，在铜的溶解度为150g/l时，这种碱性蚀刻剂的蚀刻速度达到了每分钟30～60μm铜。

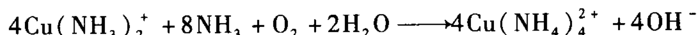
1. 化学性质

碱性蚀刻溶液通过化学方法溶解印制电路板表面的铜，包括氧化、增溶和络合。氢氧化铵和铵盐与铜离子结合生成铜铵离子［$Cu(NH_3)_4^{2+}$］，它可以使蚀刻持续进行，并使铜的溶解度保持在18～30oz/gal。

在这个闭路循环系统中，铜离子与空气中的氧气反应生成复合亚铜离子，其氧化反应过程是



$$Cu + Cu(NH_3)_4^{2+} \longrightarrow 2Cu(NH_3)_4^{+}$$



$$4Cu(NH_3)_2^{+} + 8NH_3 + O_2 + 2H_2O \longrightarrow 4Cu(NH_4)_4^{2+} + 4OH^-$$

在这个过程中铜有多少就能持续多长时间，由于铜的很高的溶解度，这种闭路循环系统在印制电路板工业中的应用得到了不断提高。下面详细列出了蚀刻过程中不同成分的作用：

1）Cu^{2+}（铜离子）：作为氧化物溶解金属铜；

2）NH_4OH（氢氧化铵）：化合剂也保证溶液中的铜；

3）NH_4Cl（氯化铵）：提高蚀刻速度，保证铜的溶解度和溶液的稳定；

4）NH_4HCO_3（碳酸氢铵）：作为一个缓冲剂，保持锡钎焊金属表面；

5）NH_4NO_3（硝酸铵）：提高蚀刻速度，保持锡钎焊金属表面；

6）$(NH_4)_3PO_4$（磷酸铵）：保持锡钎焊和镀通孔清洁；

7）$NaClO_2$（次氯酸钠）：它也是一种氧化剂，溶解金属铜。

2. 组成与操作条件

1）碳酸氢铵	75g/l
2）硝酸铵	80g/l
3）氯化铜	200g/l
4）氯化铵	100～110g/l
5）pH 值	7.8～8.2
6）温度	45～55℃
7）比重	在 20℃时为 1.2
8）铜含量	150～160g/l

3. 过程控制与再生

在 50～55℃时适合使用喷洒蚀刻。在操作过程中必须有一套有效的排放系统使氨气排出。

通过比重或密度进行自动进料控制，使蚀刻速度保持恒定。用这种方法给印制电路板蚀刻时，铜溶解在溶液中，使蚀刻溶液的密度增加。当溶液中铜的数量达到最大时，一个泵自动的补充溶液，并吸走一部分蚀刻剂，直到达到想要的溶液浓度。

这个系统的再生是通过排出消耗过的蚀刻溶液，或通过化学反应消耗使用过的溶液完成的。这个过程通过将蚀刻后的溶液与氢氧根（或有机物）反应来获取铜。含铜的混合物和硫酸反应生成硫酸铜和无铜的蚀刻剂。不断地调整反应条件，使冷却蚀刻剂、滤除沉淀的盐与溶液的再生交替进行。这种再生方法非常昂贵，只有在大规模印制电路中才被应用。

9.2 蚀刻过程

9.2.1 简单分批蚀刻

分批蚀刻适用于实验室和小型工厂偶尔进行的小型印制电路板的蚀刻。当蚀刻溶液达到饱和或者蚀刻速度非常缓慢时，要做一些简单的处理，将蚀刻溶液扔掉再加入一些新的溶液进去。

当新的分批蚀刻印制电路板开始时，必须首先确定最合适的蚀刻时间。用这种方法蚀刻的典型蚀刻剂是 $FeCl_3$。

9.2.2 连续补液蚀刻

在这种蚀刻方法中，一小股新的蚀刻溶液稳定的连续或间歇注入到蚀刻槽

里，同时，同样数量的饱和的蚀刻溶液被排出。

为了充分利用蚀刻剂对铜的溶解能力，蚀刻速度（传输速度）必须非常缓慢，然而这样会导致生产速度变慢。因此这个系统提供了部分饱和溶液的方法，或多或少可使蚀刻速度保持在一个恒定的理想数值。然而这样铜在蚀刻溶液中的溶解度不能达到最高。通常，这种连续补液蚀刻采用的典型蚀刻剂是 $FeCl_3$。

这种连续补液蚀刻系统可以通过使用几个连续的蚀刻模组加以改进。在这个系统中，第一个模组保证蚀刻溶液几乎饱和，随后的几个模组逐渐减少蚀刻剂中铜的含量，最后一个模组几乎是纯的蚀刻剂。通常，需要3~4个模组，蚀刻剂经由一个模组的槽溢出流入下一个模组中。这种方法可达到一个合理的蚀刻速度，同时使蚀刻剂对铜的溶解能力得到充分的利用。这种连续的蚀刻系统的典型问题是需要每一个模组里面的铜保持在一定的范围内。

9.2.3 开路循环再生系统

这种方法在以前的章节中曾经介绍过，它是利用添加提前混合好的高浓度的蚀刻剂，也就是通过补充化学成分和添加再生的化学制剂，使整个蚀刻过程保持在一个恒定的水平。

在这个系统中，大部分都是自动完成的，蚀刻溶液的成分是通过一个传感器对溶液的pH值、氧化还原反应能力、比重或颜色的判定进行控制的。使用这种开路循环再生系统的典型蚀刻剂是 $CuCl_2$，每升蚀刻溶液溶解130g Cu即可废弃。开路循环再生系统也可以实现人工操作，特别是对于少量生产，但是这需要小心持续地控制蚀刻溶液的成分。

9.2.4 闭路循环再生系统

闭路循环再生系统包括将铜从蚀刻后的副产品中剔除，以及将提纯铜后的蚀刻溶液送回到蚀刻槽中。虽然设备投资非常高，但对蚀刻制剂、稳定的蚀刻性能和环境污染而言，它是高效而经济的。

对于闭路循环再生系统，$CuCl_2$、过硫酸铵和碱性蚀刻剂都是非常经济实用的化学制剂。而每一种蚀刻剂有其各自的化学性质，因此其化学反应/分离系统是完全不同的。在满足化学条件时，能够促进反应过程中铜盐的生成，在一些情况下，还需要对蚀刻剂进行冷却。这时，铜盐在分离器中被滤出，并作为副产品存储在专用容器中。这种铜含量很高的副产品通常根据它以后的用途被卖掉，而且不会引起任何化学问题。

这种系统很复杂，在蚀刻过程中需要小心维系其多变的化学成分，以保证蚀刻质量的恒定。

9.3 蚀刻参数

1）蚀刻速率：蚀刻速率是指单位时间移除材料的数量。

2）蚀刻因子：蚀刻因子是正蚀深度（d）与侧蚀凹度（b）的比值。即

$$蚀刻因子 = d/b$$

9.4 蚀刻设备和技术

印制电路板的蚀刻可采用以下方法：

1）浸入蚀刻；

2）滋泡蚀刻；

3）泼溅蚀刻；

4）喷洒蚀刻。

由于喷洒蚀刻的产量和细纹分辨率高，因此它是应用最为广泛的一项技术。

9.4.1 浸入蚀刻

浸入蚀刻是一种半桨技术，它只需一个装满蚀刻溶液的槽，把板子整个浸入到溶液中，如图 9-4 所示。板子需要保持浸入直至蚀刻完成，这就需要很长的蚀刻时间，且蚀刻速度非常缓慢。可以通过加热蚀刻溶液的方法来提高蚀刻速度。这种方法适用于小型板或原型板。浸入蚀刻通常使用添加了过硫酸铵或过氧化氢的硫酸作为蚀刻剂。

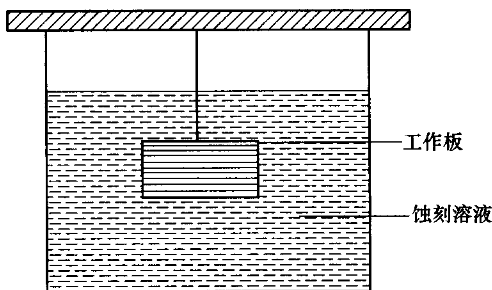


图 9-4 浸入蚀刻系统

9.4.2 滋泡蚀刻

这项技术在浸入蚀刻技术上做了一些修改，它的不同在于空气中的气体进入到了蚀刻溶液中。气体通过溶液时起两方面的作用：

1）保证表面有持续新鲜的蚀刻剂，将已经溶解了的金属冲掉；

2）提高氧化能力，使蚀刻剂再生。

图 9-5 为滋泡蚀刻的原理图。

蚀刻速度取决于空气的压力，当达到一定程度时（空气压力通常达到 2Pa），蚀刻质量会非常高。这种蚀刻方法使用硫酸铬和过硫酸铵作蚀刻剂。滋泡蚀刻

最主要的缺点是当用过氧化氢、硫酸作蚀刻剂时会产生大量的腐蚀性烟雾。如果使用滋泡蚀刻，就必须把烟雾有效地收集起来并进行净化。

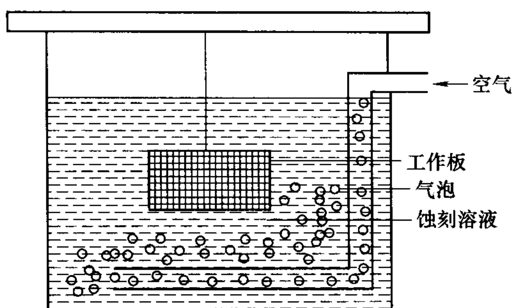


图9-5 滋泡蚀刻系统

9.4.3 泼溅蚀刻

泼溅蚀刻的原理是把一个叶片或杯子连接到一个电动机的转轴上，当电动机转动起来时，蚀刻剂在离心力的作用下喷洒到需蚀刻的板子上。也就是说，板子与溶液接触需要依靠轴的转动，叶片设计如图9-6所示。泼溅蚀刻或叶片蚀刻比滋泡蚀刻要好，因为它蚀刻均匀且侧蚀小，但是每一次只能蚀刻有限的几块板子。这种蚀刻方法通常使用氯化铁和硫酸铬溶液作蚀刻剂。大容量的容器用在槽的底部以减少溶液的更替。这项技术与自动喷洒蚀刻相比蚀刻速度较慢，因此现在已经很少使用了。

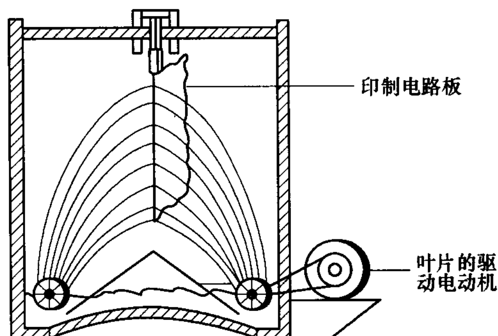


图9-6 泼溅蚀刻系统

9.4.4 喷洒蚀刻

喷洒蚀刻最简单的形式是它由一个底下有槽的盒子构成。在压力作用下通过一个喷嘴将蚀刻溶液从槽中均匀地抽上来喷洒在板子的表面。它把新鲜的溶液喷洒在板子上，具有很高的蚀刻速率。下列因素决定了蚀刻的均匀程度：

1）喷洒样式、力量、喷洒量的一致性和排放的位置；

2）蚀刻剂的化学性能、泵的压力、喷嘴的外形和放置的位置，这些条件决定了蚀刻的速度；

3）如果是双面板，两面都要进行喷洒。

在闭路循环再生系统中板子要连续地蚀刻。这种系统的蚀刻速率高，同时侧蚀小，细纹分辨率好。这种技术中经常用氯化铵蚀刻剂蚀刻双面镀通孔板，系统设备应该选用耐酸或耐碱的材料制作，比如PVC。然而，如果是用硫酸/过氧化氢作蚀刻剂的系统则需要使用不锈钢、聚碳酸酯或聚丙烯制作。

喷洒蚀刻技术有两种类型，它们是：

1）水平喷洒：这种技术在顶部和底部有两排各自独立控制的喷嘴。双侧水

平蚀刻通常主要用于生产双面板，水平喷洒蚀刻系统如图 9-7 所示。

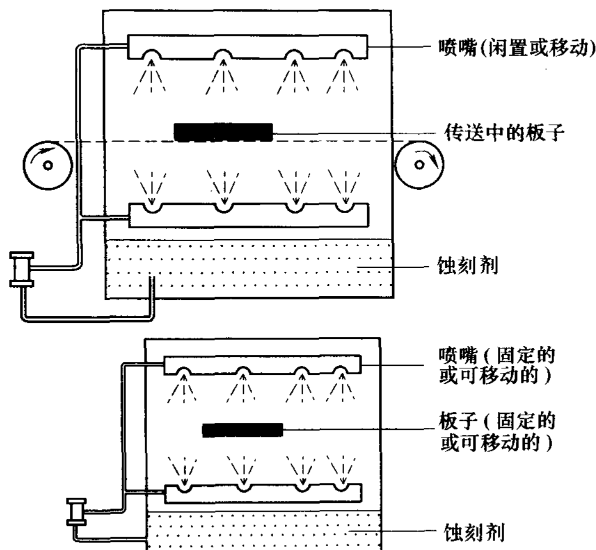


图 9-7 水平喷洒蚀刻系统

2）垂直喷洒：图 9-8 给出了垂直喷洒的示意图。在这种技术里，蚀刻是通过将板子放置在架子上，这样板子可以下降到喷洒盒的区域。随着大量的喷嘴上下或左右运动来进行蚀刻，以达到理想的结果。

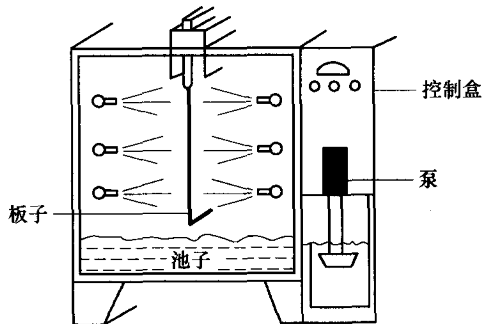


图 9-8 垂直喷洒蚀刻系统

喷洒蚀刻机器可采用全自动或半自动方式进行垂直或水平蚀刻。这种自动化蚀刻包含有压力的控制、加热、比重指示计和溶液的再生。自动设备的设计是为了提高生产速度。板子放置在架子上面，通过蚀刻室时，一排喷嘴摆动对板子进行一面或双面喷洒蚀刻，架子需要紧接着用水冲洗中和。每排喷嘴的压力很容易控制。

已经证明，对于印制电路板样板或少量印制电路板的生产，旋转蚀刻机器是很有效的。在这个设备里，蚀刻溶液被放置在槽的底部，它采用石英加热，这样可以通过电子控制，使加热时间缩短，温度保持恒定。这种设备可以处理（300×500）mm 的板子。在印制电路板制作中，在第二个蚀刻周期前放置板子的架子可以旋转 180°，此外还提供了一个刷洗槽以冲洗蚀刻后的板子。这套设备蚀刻的板子走线分辨率可达小于（大于?）0.1mm，而且在新的 $FeCl_3$ 蚀刻溶

液中其蚀刻速度只能达到90s。

9.5 蚀刻设备的选择

当选择蚀刻设备时，通常考虑以下几个因素：

1）板子的最大尺寸：板子的最大尺寸由蚀刻槽、冲洗槽、清洗槽和中和槽的尺寸决定，同时也由支架或传送机的尺寸决定。

2）板子的数量：蚀刻设备的型号由需要的产量决定。设备应该能够完成日常产量，同时还应该包括溶液调整时间、机器维护时间和实际操作的时间。

3）可用蚀刻空间：它需要有足够的装卸空间。在板子叠放的地方应该能够提供存储架、箱柜、桌子和架子的空间，这些是为了重新电镀、网印、光阻镀膜和蚀刻之用。

4）蚀刻的类型：包括细纹、粗纹或印制蚀刻。

5）板子的类型：包括金属电镀阻膜、印制蚀刻等。

9.6 蚀刻剂的最优利用的经济效益

以下是印制电路板制作工业中希望达到的各种性能标准，但在实际中只能部分地实现：

1）蚀刻速度高；

2）铜的溶解度高；

3）不攻击抗蚀阻剂；

4）蚀刻速度恒定；

5）使用后的蚀刻剂或副产品易处理；

6）很少的毒性和烟雾；

7）易再生；

8）化学药品的低投入；

9）蚀刻后的清洁容易等。

选择设备的不同，达到以上要求的程度也不同。喷洒蚀刻设备被认为是当今最接近以上标准的设备。

9.7 蚀刻过程中的问题

蚀刻是印制电路板制作工业中重要的一步。它看上去简单，但实际上，如果在蚀刻阶段出现问题将会影响板子的最终质量，特别是在生产细纹或高精度

印制电路板时，尤为重要。在制作过程中经常遇见的两个问题是侧蚀和镀层突沿。

9.7.1 侧蚀

在蚀刻过程中，希望蚀刻是垂直的，然而蚀刻剂的作用是向所有方向的。在实际操作过程中，蚀刻作用经常会攻击到阻剂下面图形的边缘部分，随着液体的搅动，铜被逐渐溶解，边缘蚀刻扩大。最后导体壁变成倾斜的，而不是垂直的，如图 9-9 所示。它能导致导线宽度大幅度缩小。

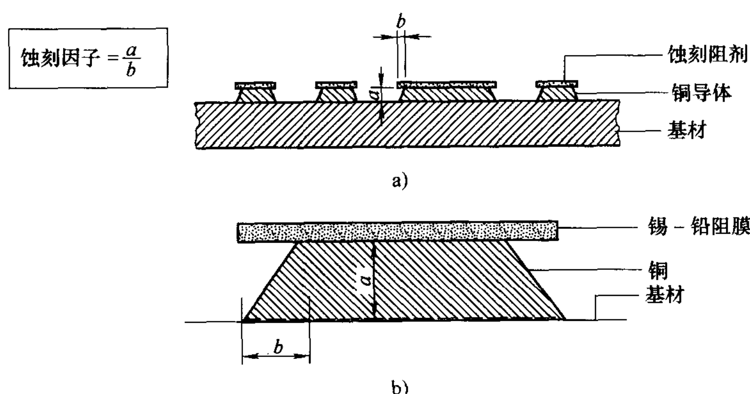


图 9-9 蚀刻因素图解

a）蚀刻深度 b）侧蚀

最简单的减小侧蚀的方法是尽最大可能缩短蚀刻时间，这要求快速完成蚀刻，准确掌握蚀刻的时间。

通常用于表示侧蚀的术语是蚀刻系数，定义为蚀刻深度（铜箔的厚度）与侧蚀凹度的比率，即

$$蚀刻系数 = a/b$$

式中，a 为铜箔的厚度；b 为侧蚀凹度。

要使细纹蚀刻的侧蚀达到最小，最好采用 1/2oz 或者更少的铜箔，并且在蚀刻完成时立即把板子从蚀刻机器上移开。

9.7.2 镀层突沿

当使用金属抗蚀镀层时，例如在电镀过程中，电镀金属隆起可能形成侧面凸出，这称为镀层突沿（见图 9-10）。这就带来了一个潜在的问题，因为过多的镀层突沿可能会折断或形成很窄的金属条，垂落下来可造成邻近的导体之间短路。所以，在蚀刻之后最好把镀层突沿剔除掉。可以通过软黄铜刷、超声搅动

和冲洗剥除，也可以通过熔化镀锡层将其剥除。在许多情况下，只有软黄铜刷是最合适的。镀层突沿这个难题在使用干膜后大幅度地减少，干膜适用厚度可达到70μm，因此它能够有效地防止侧面电镀层的生成。图中也绘出了金属抗蚀镀层的侧蚀和镀层突沿。在要求严格的情况下，镀层突沿和侧蚀的影响可以通过改变照相底板上的导线宽度来补偿。

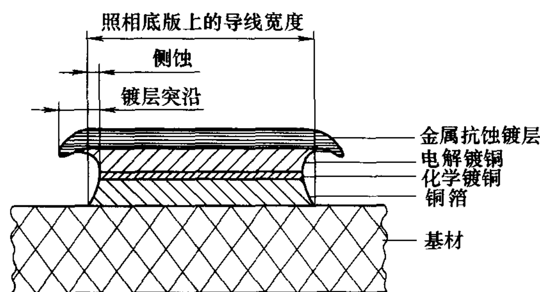


图9-10　图形电镀印制电路板中的镀层突沿和侧蚀

9.8　蚀刻区的设施

以下是对蚀刻区设施的要求：

1）适当的电功率、排放系统、存储空间和安全防护设施；

2）底部结构应该有抗化学性瓷砖和泥灰或是防酸的环氧树脂涂层；

3）槽和管子必须远离地面，能够进行检验且尽最大可能保持干燥；

4）槽应该被支撑高出底部，且要有适当的检查端口。

5）消耗后的溶液不应该直接排放到下水道。应该按照规定的污染控制标准，冲洗后排出。

9.9　电化蚀刻

在电化蚀刻中，被蚀刻的材料作为阳极，阴极通常使用一种类似的材料。电解质经常使用蚀刻后的金属。蚀刻速度可通过改变电流进行控制。

9.10　机械蚀刻

在机械蚀刻过程中，金属表面被多轴铣床有选择地切除，由一个特殊的铣刀剔除焊盘和导线边缘窄的铜条。现在有许多种形状的专用机械蚀刻钻头，但是多数使用者认为带有螺旋凹槽的钻头（相对于平面铲式钻头而言）在高速切割时更能有效地消除铜屑并保持尖锐。常见的尖角一般为60°和90°，90°似乎更具穿透性，同时具有更长的寿命。如果电路设计也要求剔除非电路中的部分（或全部）铜，可以用常规的碳头铣具来加速铜的清除进程，典型的直径范围为

0.010～0.050in（2.5～1.27mm）[㊀]。图9-11给出了典型的机械蚀刻设备，碳化蚀刻可移除每一个电路元器件周围的铜条。电绝缘就是通过从碾磨槽中全部清除所有铜的碎屑。

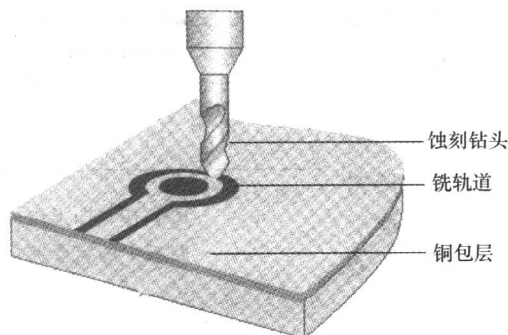


图9-11　机械蚀刻技术

这个过程仅适用于设计和开发原型插件。这种用于机械蚀刻的特殊机器称为“快速原型机”。在这些机器中，设计信息用Gerber格式输入，它是装载设计者的原型设计软件（Crum，1995）。一旦原型设计完成，这个软件就能够把这些信息转换为Gerber文件了。输出Gerber文件可作为原型，用于产品的批量生产。标准的LPKF快速原型机器（见图9-12）能够生产4mil的线和间距，Gerber公司的激光设备可生产更细密的线和间距。

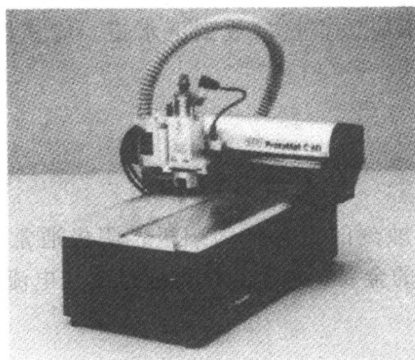


图9-12　快速原型机
（经德国LPKF同意）

㊀ 原书此处有误，应为0.010～0.050in（0.254～1.270mm）。——译者注

第 10 章　机械操作

10.1　机械操作的需求

在印制电路板的制作过程中，需要进行大量的机械操作为化学过程作准备，包括图像转移、电镀和蚀刻。制程首先需要从2m×2m 或更大的层压板开始，因此，尺寸切割、钻孔和成型等这些机械操作在制作优良的制板中起着重要的作用。

不同于印制电路板其他制作工序，大多数机械操作需要大量的手工操作完成。这些手工操作不包括在设备生产线之内，因此会增加产品最终的成本。

每一种机械操作都有它自己需要的容差和准确度。一般来说，容差的大小应该根据实际的功能需求来确定。适当的工具和锋利度的选择对完成一件合格的产品来说是非常重要的。由于树脂基板脆性大，因此钝的工具容易使其破碎。机械操作过程中必须适当保持较低的机械力，这是由于太大的机械力会破坏固有的层间结构，使层间的粘接力降低，造成部分层间的分层。因此，充分了解基材的组成、设备和工具的性能，养成良好的操作习惯，能够更好地进行机械操作，制作出高质量的印制电路板。

10.2　切割方法

10.2.1　剪切

剪切是印制电路板机械操作的第一步，通过剪切可以给出大致的形状和轮廓。基本的切割方法适用于各种各样的基板，通常厚度不超过 2mm。当切割的板子超过 2mm 时，剪切的边缘会出现粗糙和不整齐，因此，一般不采用这种方法。

层压板的剪切可以是人工操作也可以是电动机械操作，不论哪种方法在操作上有共同的特点。剪切机通常有一组可调节的剪切刀片，如图 10-1 所示。其刀片为长方形，底部的刀口有大约 7°的可调节角度，切割长度能够达到 1000mm，两个刀片之间的纵向角度通常最好选在 1°～1.5°之间，使用环氧玻璃基材最大能够达到 4°，两个刀片切割边缘之间的缝隙要小于 0.25mm。

两个刀片之间的角度要根据切割材料的厚度进行选取。材料越厚，需要的

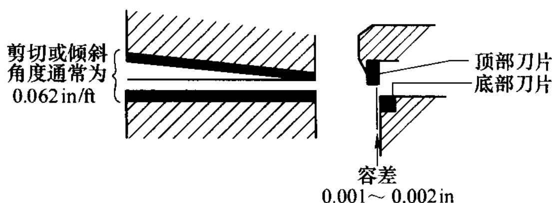


图 10-1　典型的可调节覆铜板剪切刀片

角度越大。如果剪切角度太大或两个刀片之间的间隙太宽，在切割纸质基板时会出板龟裂，然而对于环氧玻璃基板，由于材料具有一定的抗弯强度，即使不出现裂缝，板子也会变形。为了在剪切过程中使底板边缘保持整洁，可将材料加热在 30～100℃ 范围内。

为了获得整齐的切割，必须通过一个弹簧装置将板子牢牢的压下，以防止板子在剪切过程中出现其他不可避免的移位。另外，视差也可以导致 0.3～0.5mm 的容差，应该使其减到最小，使用角标可提高精度。

剪切机能够处理各种尺寸，能够提供精确的重复尺寸。大型机器每小时能够切割几百千克的基板。

10.2.2　锯切

锯切是切割基板的另外一种方法。虽然这种方法的尺寸容差与剪切类似(0.3～0.5 mm)，但是这种方法更为可取，因为其切割边缘非常光滑整齐。

在印制电路板制作工业中，大多选用可移动工作台的圆形锯切机。锯形刀片的速度可调范围为 2000～6000r/min。但是切割速度一旦设定，则不能更变。它是通过具有不只一个 V 带的重滑轮实现的。

高速运动的钢制刀刃的直径大约为 3000mm，它可以以 2000～3000r/min 的速率切割纸制酚类材料，每 1cm 圆周上大约为 1.2～1.5 齿。对于环氧玻璃基板，使用碳化钨刀刃的刀片。钻石轮的切割效果会更好，虽然它在刚开始时投资大，但是由于其使用寿命长且能够提高边缘切割效果，因此它对以后的工作是非常有益的。

以下是使用切割机时需要注意的几个问题：

1) 注意直接作用在边缘上的切割力，检查轴承的坚固程度。当用手检查时不应有任何异常的感觉；

2) 为了安全起见，齿片应总是被保护装置覆盖着；

3) 应该准确放置安装轴和发动机；

4) 在锯齿片和支架之间的缝隙应该最小，这样可以使板子具有很好的支撑，以便于进行边缘切割；

5）圆形锯应该可调，刀刃与板子之间的高度范围应该为10～15mm；

6）钝的齿片和太粗糙的齿会使切割边缘不光滑，最好予以换掉；

7）错误的切割速率会导致切割边缘不光滑，应适当调配，厚的材料需要选择慢的速度，而薄的材料可以快速切割；

8）应该按照制造商给出的速度操作；

9）如果锯的齿片很薄，可以增加一个加固垫以减少振动。

10.2.3 冲切

当印制电路板设计除了矩形外还有其他形状或不规则的轮廓时，使用冲切模具是比较快速和经济的方法。基本的冲切操作可以使用冲床完成，其切割边缘整齐，效果优于使用锯切或剪切机。有时，甚至打孔和冲切可同时进行。然而，当要求上好的边缘效果或小的容差时，冲切达不到要求。在印制电路板工业中，冲切一般应用于切割纸制基板，而很少用于切割环氧玻璃材料基板。冲切能够使印制电路板的切割容差在±（0.1～0.2mm）之内。

1. 纸制基板的冲切

由于纸制基板比环氧玻璃基板柔软，因此它更适合用冲切的方法切割。当使用冲切工具切割纸制基板时，要考虑材料的回弹或弯曲度。因为纸制基板常常回弹，通常冲切部分要比模具稍微大一点。因此，模具的尺寸选取要依据容差和基材的厚度，比印制电路板稍微小一些，以补偿超过的尺寸。就像人们注意到的，当打孔时，模具大于孔的尺寸，而当冲切时，模具又小于正常尺寸了。

对于外形复杂的电路板来说，最好选用步进的工具，例如对材料进行逐条切割，随着模具对它逐条冲切，材料的形状逐渐改变。这样，通过最初的一步或两步将孔穿通，最终完成其他部分的冲切。加热后再进行冲孔和冲切可改良印制电路板的切割效果，例如将板条加热至50～70℃再冲切。然而，必须小心对待使其不能过热，因为这样会使冷却后的伸缩性降低。另外，对于纸制苯酚材料的热膨胀应该加以注意，因为它在x方向和y方向呈现不同的膨胀性能。

2. 环氧玻璃基板的冲切

当用剪切或锯切生产不出环氧玻璃基板所需的形状时，可用一种特殊的打孔方式冲切，虽然这种方式不受欢迎，因此只有当切割边缘或尺寸要求不太严格时才能使用这种方法。因为尽管在功能上可以接受，但是切割边缘看上去不很整齐。由于环氧玻璃基板的回弹性能与纸制基板相比要小，所以冲切环氧玻璃基板的工具在冲模与冲床之间要有紧密的配合。环氧玻璃基板的冲切要在室温下进行。

由于环氧玻璃基板坚硬，冲切困难，所以会使冲床的寿命降低，很快就会被用坏。使用硬质合金顶尖的冲床可以收到较好的切割效果。

10.2.4 铣削

铣削通常应用于要求印制电路板切割整齐、边缘光滑以及尺寸精度高的场合。普通的铣削速度在1000～3000r/min范围之内，通常使用直线型或螺旋型齿高速钢铣削机器。然而，对于环氧玻璃基板，最好使用碳化钨工具，因为其寿命较长。为了避免分层，铣削时印制电路板的背面必须有坚固的衬板。关于铣削机、工具和其他操作方面的详细资料，可参考工厂或商店有关这些设备的标准说明。

10.2.5 研磨

为了获得比剪切或锯切更好的边缘效果并达到更高的尺寸精度，特别是当印制电路板有不规则的轮廓线时，可以选择研磨的方法。采用这种方法，当尺寸公差为±（0.1～0.2mm）时花费的成本比冲切少。因此在有些情况下，在冲切超出的尺寸，可以在随后的研磨过程中修整，得到光滑的切割边缘。

现在所使用的多轴机器使研磨非常迅速，而且工人的投入和总成本都比用冲切时要更少一些。

当板子的走线靠近边缘时，研磨可能是能够获得令人满意的电路板切割质量的惟一裁切的方法。

研磨的基本机械操作过程同铣削类似，但它的切割速度和进刀速度要快得多。板子以研磨夹具为基准沿着垂直的磨削面进行移动。研磨夹具根据磨削的需要被固定在一个与磨具同中心的轴衬上。印制电路板在研磨夹具的位置由材料的对位孔决定。

主要有三种研磨系统，它们分别是：

1）针式研磨系统；

2）跟踪或记录针研磨系统；

3）数控（NC）研磨系统。

1. 针式研磨

针式研磨最适合于小批量生产、切割边缘平滑、精度高的研磨。针式研磨系统有一个严格按照印制电路板要求的轮廓制作的钢制或铝制的精确模板，该模板同时也提供了板子定位的针脚。通常有三块或四块板子叠放在工作台上突出的定位针脚上。所用刀具和定位针脚的直径相同，堆叠的板子研磨的方向与刀具的旋转方向相反。通常，由于研磨机容易使板子偏离定位针，因此要经过大约两次或三次循环研磨，以保证正确的研磨轨迹。

虽然针式研磨系统需要的劳动强度大，要求操作人员技术高，但是其精度高、裁切边缘光滑，最适合小批量和不规则形状板子的研磨。

2. 跟踪研磨

跟踪研磨系统同针式研磨系统一样使用模板进行裁切。这里，记录针在模板上跟踪板子的轮廓线。记录针可以控制固定工作台上钻轴的运动，或者如果固定了钻轴它可以控制工作台的运动。后者经常用于多钻轴机器。

模板按照裁切板子的轮廓制造，在它的外缘有一个跟踪轮廓的记录针。裁切的第一步是由记录针跟踪外缘。在第二步中，记录针跟踪内缘，这可以卸掉研磨机上的大部分负载以便更好地控制裁切尺寸。记录针研磨系统比针式研磨系统精度要高。采用一般的操作技术，可使大批量生产的产品容差达到 ±0.010in(0.25mm)。采用多钻轴机器可以同时对 20 块板子进行研磨。

3. NC 研磨系统

具有多钻轴的计算机数字控制（CNC）技术是当今印制电路板制造工业中研磨的首选方法。当生产产品的产量大，且印制电路板的轮廓复杂时，一般选择数控研磨系统。在这些设备中，工作台、钻轴和切割机的移动都是由计算机控制的，而机器的操作者只负责装载和卸载。特别是对于大批量的生产制作，复杂形状的切割容差非常小。

在数控研磨系统中，控制钻轴在 x、y、z 方向运动的程序（一系列命令）很容易编写，这些程序能使机器依照一定的路径进行研磨，研磨速度和进刀速度的命令也写进程序当中，可以通过改写软件程序方便地改变设计。切割轮廓的信息直接通过程序输入到计算机中。

碳质数控研磨机的转数通常能达到 12000～24000r/min，这就需要发动机有足够的驱动能力，以确保研磨机的转数不至于过低。

加工或定位孔通常在电路板的靠外部分。虽然研磨能够实现直角的外部结构，但是内部结构在第一步研磨中需要用相等半径的刀具进行裁切，然后在第二次操作中通过 45°角切割，这样就可以得到直角的内部结构了。

在数控研磨机中，切割速度和进刀速度参数主要是由基板类型和厚度决定的。切割速度为 24000r/min，进刀速度为 150in/min，可以有效地应用于许多基板，但是对于像聚四氟乙烯的软材料和其他类似的材料，基板的粘合剂在低温下会流出，因此需要 12000r/min 的低转速和 200in/min 的较高进刀速度，以减少热量的产生。

通常使用的切割机是固态碳化钨类型的。由于数控机器可以精确地控制工作台的移动，保证切割机器的钻头不受震动的影响，因此小直径的切割机裁切效果也很好。

在数控研磨中，切割机齿轮的几何形状起着重要的作用。由于进刀速度高，

应选用开放齿轮的切割机，这样碎屑能够迅速并容易地排出。通常，钻石的切割齿轮的寿命达到15000线性英寸时开始出现磨蚀。如果需要很平滑的切割边缘，就要使用有凹槽的切割机。

为了加速装载和卸载，机器自身要有一套有效地装卸和排放碎屑的系统。可通过不同的方法把板子装载到机器的工作台上，同时正确定位以便于研磨。最常用的方法是采用可以来回移动的工作台，这样在机器切割的同时就可以完成装卸了。

4. 激光研磨

现在，激光也被用于研磨，自由的编程和灵活的操作模式使得紫外线激光特别适用于高精度的HDI切割。所能达到的切割速度与材料有关，典型范围为每秒50~500mm。切割后的边缘非常整齐不需要任何处理，效果如同常用的机械研磨或是冲孔或是用CO_2激光切割时要求的那样（Meier和Schmidt，2002）。

10.3 冲孔

在印制电路板上冲孔像钻孔一样，也是一种机械操作。然而，在孔的直径精度、孔壁光滑度和焊盘与底板分层上则不如钻孔好。总的来说，大孔比小孔容易冲孔。例如，对于强化纸制基板小于0.9mm的孔和强化玻璃布基板小于1.2mm的孔，冲孔失败是很常见的。因此，冲孔应用在消费类大批量印制电路板产品中，而这种印制电路板采用的是纸制苯酚类和环氧基类基板。冲孔的另一个缺点是焊盘分层和基板在连接孔处断裂。另外，冲孔会导致形成的孔是圆锥形且表面相当粗糙，因此不符合专业要求的印制电路板对镀通孔表面光滑度有较高的要求。

冲孔除了有一些缺点外，也有一些优点，它们是：

1）由于许多孔可以同时被冲，因此需要的操作成本低；

2）非常高的生产速度；

3）孔定位的高精度和可重复性。

实际上冲孔有10~40t的压力和100~200次/mm冲击。在单面板中，冲孔用在有覆铜箔的那一面。当纸制基板冲孔时，必须注意材料的反弹以及由反弹造成的冲孔孔径要比所用的钻孔机稍小一些，其差别的大小在于材料的厚度。因此，冲孔时，要求掌握实际的容差，以获得正确的孔尺寸。通常，对于1.6mm厚的板子，冲孔的直径应比所要求的直径大0.1~0.12mm，典型的冲孔直径容差为±0.1mm。

为了精确加工，必须使钻孔机和冲孔之间有精密的容差。通常，对于纸制基材，冲孔应比钻孔机大0.002~0.004in，而对于玻璃基板，应该是这个容差的

一半，图 10-2 给出了钻孔机和冲孔之间所需容差的实例。

冲孔负载依赖于基板的类型和它们的裁切力。纸制基板所承受的裁切力为 1200psi（最大），而环氧玻璃基板所承受的裁切力最大为 20000psi。因此纸制基板应该能够承受 16t 的压力。为了提高安全系数，经常使用 32t 的承受压力。环氧玻璃基板比纸制苯酚类基板的抗压能力高 70%，即使是简单的板子也需要高抗压能力。

对于纸制苯酚类基板（XXX 和类似类型），为了避免碎裂，在冲孔之前需要预先将温度加热至 50～70℃。像 XXXPC 和 FR-2 基板可以在室温下进行冲孔，只要高于 20℃就可以了。

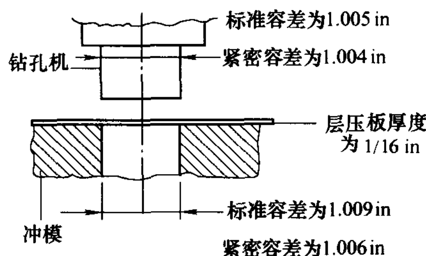


图 10-2 钻孔机和冲孔之间适当的容差

非编织强化玻璃基板（环氧类和聚酯类）有很好的冲孔性能。采用 50～100μm 的冲模间隙可以得到适合电镀的光滑孔壁。

采用下面的技术可以减少冲孔中的许多问题，如焊盘分层等。

1）冲孔要在覆铜面进行；

2）冲孔前要先进行蚀刻；

3）冲孔的焊盘必须足够大。

印制电路板的数量足够多，至少要达到 2000 个，冲孔才会经济合算。所以，大批量的无镀通孔强化纸制基板更适合于冲孔，其他则适合于钻孔。

在冲孔过程中，小冲孔的破损率较高，这是因为：

1）定线不够标准：通过精密检测工具可以很容易发现；

2）设计不好：这通常是由于指冲孔太小，达不到要求。

进行冲孔时，总是发生铜箔边缘翘起。因此，板子两面都设计有线路是不可取的，这会导致焊盘脱落。另外，如果孔之间的距离太小，则有可能出现裂缝。在这种情况下，应当改变操作程序，冲孔之前不要进行铜箔蚀刻。这样铜箔可以起到加固作用，并且有助于避免出现裂缝。

10.4 钻孔

钻孔是印制电路板制作过程中一个重要的机械操作过程，其有两层作用：

1）保证元器件引脚的安装精确和结构完整；

2）在顶层与底层之间建立电气连接，有时还提供中间层的导体通路。

电路板钻孔后，还要经过其他不同的加工，如电镀、成像、蚀刻和镀焊锡。

所以，钻孔后的孔需要小心对待以保证表面光滑，这对于得到一个高质量的产品有着重要的意义。钻孔的质量取决于各种因素，例如基板和钻孔机的质量、钻孔过程中机器的精确度、钻孔技术、操作人员的控制技术以及孔与钻针的质量评定。钻孔过程中重要的步骤如图 10-3 所示。

当所有的步骤完成后，就会得到高质量的钻孔。这些板子可以直接电镀，而不用其他过程如清理毛刺、去除沾污和回蚀。这样使得制作过程简单、效率高、成本低。

各种研究已经确定导致 85% 电路板故障的根源可归结于钻孔。检查板子生产的整个过程，可以发现许多设计步骤是用于在钻孔后续操作过程中纠正尺寸，以改正钻孔过程中造成的缺陷。例如，用机器洗涤去除毛刺、用化学制剂去除胶糊渣和粘接的碎屑、回蚀使玻璃纤维感光、用酸或碱清洗剂去除污物，这些方法都是用来去除钻孔过程中引起的问题的。因此，与其在钻孔后补偿出现的问题不如把更大的注意力放在寻找问题的根源。

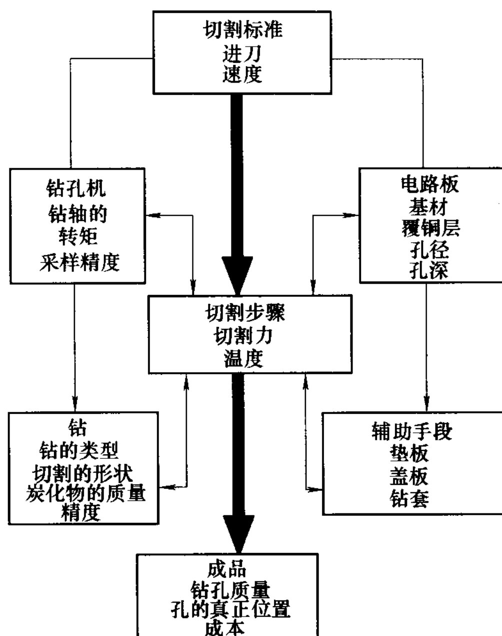


图 10-3 钻孔的典型步骤

使用单个钻头钻孔时通过手动控制机器，操作人员通过目镜或活动臂将焊盘置于中心位置。大型生产设备通常是利用几个钻头的数控钻孔机。

10.4.1 钻头的几何形状及其重要性

在印制电路板中用于钻孔的钻通常是由高速钢和碳化钨制成的。它们可以是两种形状：普通柄钻和直柄钻。图 10-4 为两种钻的几何形状。

钻头的作用是切割和剔除基材和铜，因此钻头设计同材料的使用一样重要。钻头设计以及在使用期间的磨损和裂缝都会影响孔壁的光滑度，钻入和退出时会燃烧带出碎屑，这会影响钻头的温度。因此，弄清钻的每一部分的几何形式和功能是非常重要的。大多数用于印制电路板钻孔的钻头是普通柄形状。这样，钻孔机的一个夹头可以使用多种直径的钻头。图 10-5 给出了钻头典型的几何形状。顶角决定了其切割基板的能力，通常在 90° ~ 130°之间。对于纸制基板

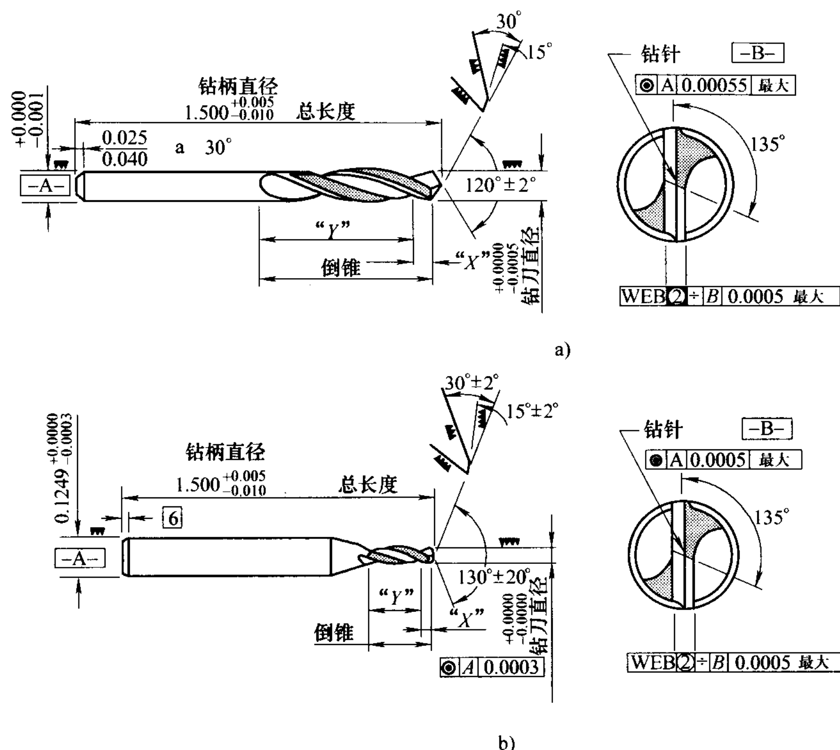


图 10-4 直柄钻和普通柄钻（经 Coombs 同意重绘，1988）

a）直柄钻 b）普通柄钻

（FR-3）在 90°～110°之间，而对于玻璃基板（FR-4，G-10，FR-5）则在 115°～130°之间。钻孔时常用的顶角为 130°。

钻尖有两个主要的刀刃，它们互相平行，由蹼部分开。用于切割的刀刃称为横刃。横刃必须是笔直的，以保证切割均匀、无刻痕和磨痕。切削铠角（见图 10-6）必须相等，否则钻孔就会不在中心。

切削铠角或螺旋角的范围是 20°～50°，它决定了碎屑从钻孔中排出的能力。螺旋角要大一些（50°），以保证碎屑很好的排出且防止钻头破损。钻头的退屑槽应该是光滑的，以降低由于摩擦产生的热，提高钻头的寿命。

10.4.2 钻头的类型

通常，大多数印制电路板钻孔多选用硬质合金钻头而不用高速钢钻头（HSS）。硬质合金钻头的耐热性好、硬度高。钻头的横刃和钻尖的质量是非常重要的，钻头不应该被金属或硬表面挤压，以避免损坏钻头的几何形状。钻头应该用 1% 的磷酸钠水溶液清洗 20～30s，这样可以去除表面的油污和碎屑。

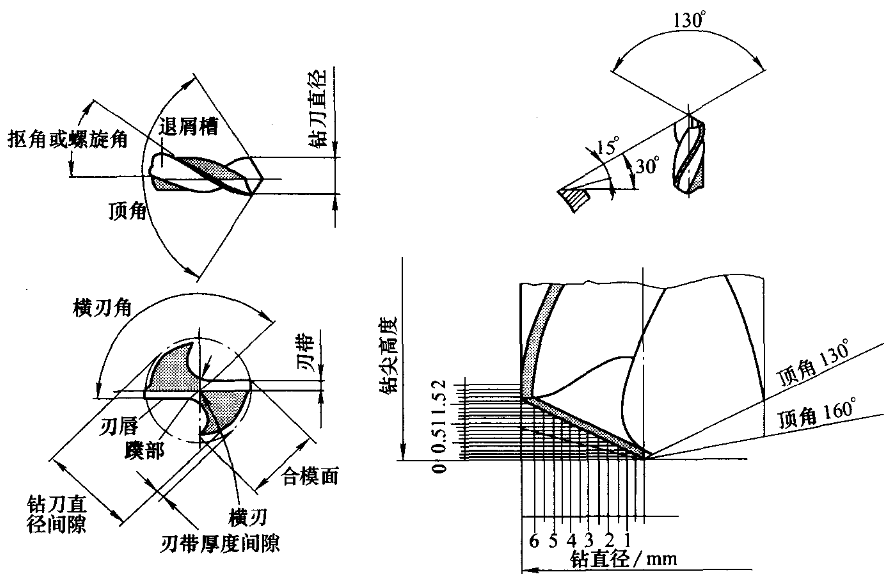


图 10-5 钻头的典型形状

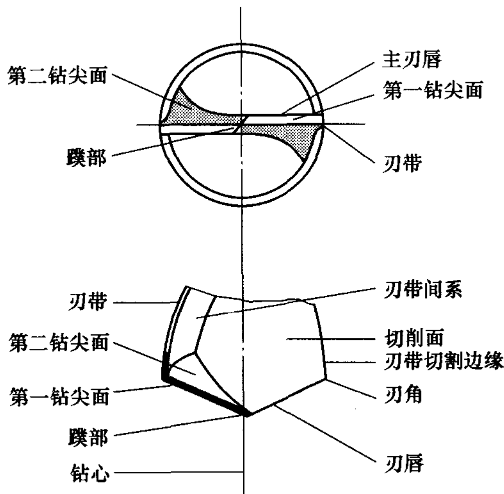


图 10-6 钻尖的几何形状以及蹼部和凿尖角的位置

硬质合金是不含铁的金属，自然状态下坚硬。换句话说，它与钢不同。它的硬度由两个因素决定，即硬质合金和扩散粘接金属（钴）的结构。硬质合金主要决定钻头的抗磨损能力，扩散粘接金属的比率决定钻头的硬度。温度为 1300～1600℃时，莫氏硬度为 9.8～9.9。现在，精细合金粒子的碳化钨钴合金钻头含 94%的碳化钨和 6%的钴。

印制电路板中，0.024in（0.6mm）以及更大的孔所用的标准钻是由抗磨损碳化钨硬质合金晶体组成，其成分是 94%的碳化钨（WC）和 6%的钴（Co），这样的组成可以提供最高的钻孔速度和最长的使用寿命。对于直径为 0.018in（0.45mm）或更小的孔，在印制电路板钻孔时会遇到一些问题，包括钻头由于频繁缩回而易破坏，孔所在位置的碎屑增多，及由于印制电路板叠放高度减少导致的产量下降，Johnson 和 Sparkman（1996）指出，类金刚石钻头（DLC）的使用延长了使用寿

命，操作速度比普通钻头快 25%，孔的定位能力得到了提高，同时也增强了制作高难度产品的能力，如不使用的连接盘和微小钻孔。

10.4.3　钻头的检查

当钻头在 G-10 或 FR-4 基板上钻 6000 ~ 10000 个 1.59mm 厚的孔后，孔壁的质量会下降得非常迅速。对于其他类别的基板如 FR-2，钻头也受到几乎同样的磨损。然而 G-11 和 FR-5 钻头非常坚硬，几乎是普通钻头寿命的两倍。因此在印制电路板生产中钻头的检查是非常重要的，因为钻头的费用大约占整个印制电路板投资的 25%。因此整个刀具的几何形状包括顶角、螺旋角、后角、蹼部厚度、刃带宽度、刃带间隙、退屑槽部分的探伤、全长、退屑槽长度和钻头直径都应该用工厂的显微镜检查。机械测量设备不应该用于钻头检查，因为它会损坏钻头的几何形状（见图 10-7）。

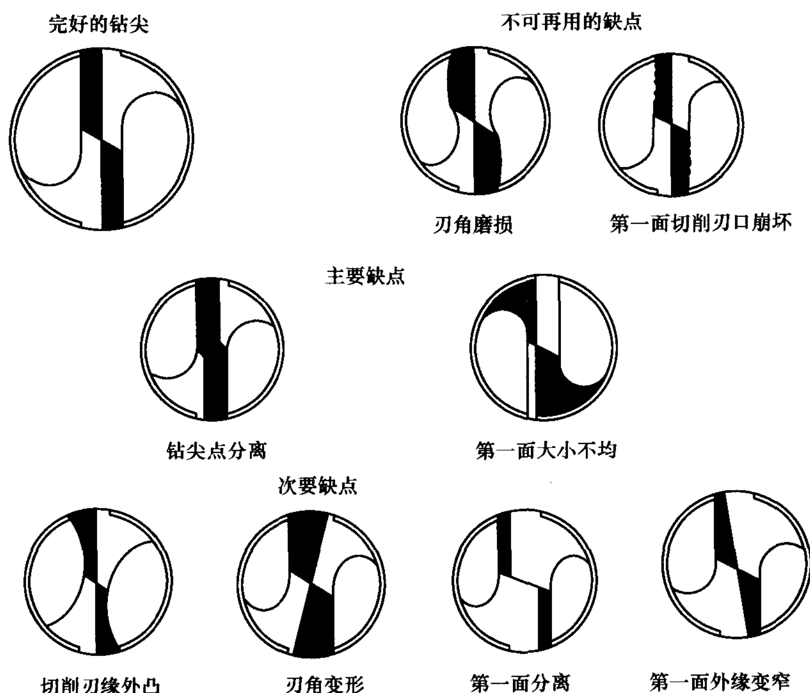


图 10-7　常见钻的损坏状况

钻头有效的使用时间是建立在生产过程和对印制电路板质量要求基础之上的。要使钻孔的质量稳定，最切实可行的方法是周期性地从钻好的面板中取样，用无电镀铜电镀，进行微切片，并通过显微镜检查。

10.4.4 钻头的尺寸（见表 10-1）

表 10-1 钻头尺寸——十进制和米制的等效换算

尺寸	十进制	mm	尺寸	十进制	mm
85	0.011	0.2794	36	0.1065	2.7050
80	0.0135	0.3429	35	0.110	2.7939
75	0.021	0.5334	34	0.111	2.8193
70	0.028	0.7112	33	0.113	2.8701
65	0.035	0.8890	32	0.116	2.9463
60	0.040	1.0160	31	0.120	3.0480
59	0.041	1.0414	30	0.1285	3.2638
58	0.042	1.0668	29	0.136	3.4543
57	0.043	1.0922	28	0.1405	3.5686
56	0.0465	1.1811	27	0.144	3.6576
55	0.052	1.3208	26	0.147	3.7337
54	0.055	1.3970	25	0.1495	3.7972
53	0.0595	1.5113	24	0.152	3.8607
52	0.0635	1.6129	23	0.154	3.9115
51	0.067	1.7018	22	0.157	3.9877
50	0.070	1.7780	21	0.159	4.0385
49	0.073	1.8542	20	0.161	4.0893
48	0.076	1.9304	19	0.166	4.2163
47	0.0785	1.9939	18	0.1695	4.3052
46	0.081	2.0574	17	0.173	4.3941
45	0.082	2.0828	16	0.177	4.4957
44	0.086	2.1844	15	0.180	4.5719
43	0.089	2.2606	14	0.182	4.6227
42	0.0935	2.3749	13	0.185	4.6989
41	0.096	2.4384	12	0.189	4.8005
40	0.098	2.4892	11	0.191	4.8513
39	0.0995	2.5273	10	0.1935	4.9148
38	0.1015	2.5780	9	0.196	4.9783
37	0.104	2.6415	8	0.199	5.0545

10.4.5 刀具寿命及翻磨

刀具的寿命由钻头需要翻磨时所钻孔的数量来表示。通过下列性能来确定刀具的寿命：

1）需要钻孔的基材类型；

2）孔的质量；

3）实际的裁切环境。

当用于高精度多基板时，钻头最多在钻完500个孔时就要更换，如果钻双面板，钻头钻完2000～3000个孔后要更换，每次钻孔为3层堆叠的电路板。当最上层电路板的铜层不断有越来越多的毛头形成时，刀具的使用寿命就结束了。这时钻头变钝，很容易断裂。

为了保证钻头锋利不损坏，一般情况下在多层电路板上可以钻750～1500次，在双面板上可以钻2000～3000次，在单层板上则可多达3000多次。

用于印制电路板钻孔的硬质合金钻头可在专用机器上翻磨2～5次，在翻磨过程中，整个磨损的刃带都要打磨掉，否则翻磨的钻头会在孔中阻塞。一些钻头翻磨机有内置显微镜，可以放大20倍。对于0.2～0.4mm的印制电路板，使用这种机器翻磨的钻头可以达到最高的精度和最好的翻磨质量。孔径越小，对钻头要求越严格，需要的钻孔质量越高，因此越小的钻头可以翻磨的次数就越少。钻头的更换和翻磨对印制电路板生产商而言就意味着更多的支出。所以正确的保管、操作和检查对于控制成本、提高钻头寿命和保持最优的性能都是非常重要的。

10.4.6 钻孔的要求

优质的钻孔技术必须满足以下条件：

1）高质量协调一致；

2）孔电镀完美；

3）孔径小，两孔之间的距离短；

4）产量高；

5）成本低，存储简单。

在计算机数控钻孔中，所有这些都易于实现，在以后的章节中会再介绍。

10.4.7 钻速、进刀率和回退率

刀具操作时，速度和进刀率都是重要的裁切条件。

1. 钻速

钻速是指转轴的速度，用每分钟旋转的圈数来表示（r/min）。在印制电路

板制作中，最小钻速为15000r/min，一般选用范围为20000～60000r/min。

2. 进刀率

进刀率表示钻头每旋转一周穿透材料的深度，用mm/转表示，其公式如下

$$进刀率=\frac{进刀量/min\times 1000}{钻速}$$

式中，进刀量的单位为m/s[⊖]钻速的单位为rpm。

如果进刀率可在每转0.01～0.05mm的范围内连续可调，则可达到最佳效果。机床通常有控制钻速和进刀率的装置。当钻速为15000～60000r/min时，进刀率可以根据具体的速度进行调节：

1）对于光滑的孔：　10～30μm/转；

2）对于镀通孔：　30～60μm/转；

3）对于低精度的孔：　60～100μm/转。

3. 切割速度

切割速度是单位时间内完成的切割路径，单位为m/min，公式如下

$$切割速度=\frac{钻头直径\times\pi\times 钻速}{1000}$$

对于碳化钨钻头，合适的切割速度范围为70～200m/min。

4. 回退率

当钻孔结束后钻头从孔中退出来所需的时间称为回退率。

10.4.8 清洁孔的作用

进刀率和切割速度决定孔的质量，同时影响工具的质量和使用寿命。钻孔时间的长短直接影响了产生的热量和升温幅度。

进刀率大可以减少钻孔的时间，切割速度低可以降低钻与孔壁之间的摩擦，这样就可以减少热量的产生，从而可以防止环氧树脂涂污，并可降低对钻头的磨损。

如果进刀过快，将会使钻孔粗糙或钻头断裂。如果进刀过慢，钻头会在孔中过分转动，造成热量累积，并在孔壁上留有过多胶渣。

例如，当进刀率为每转小于0.02mm时就不能再使用了，因为此时钻尖已经切割不动材料，这样会导致温度升高，钻头磨损。对于纸制和玻璃基材，通常钻头每转约钻0.0001～0.003in（0.0025～0.075mm），较小的钻头甚至每转可钻0.0009in（0.0225mm）。顶角为100°的长麻花钻头适合于酚醛板钻孔，顶角为120°的短麻花钻头适合于环氧玻璃基板钻孔。

⊖ 本书此处原文似有误，mts = m/s，与进刀率计算时的单位换算不符，应改为“m”。——译者注

为了补偿基板的反弹，所用的钻头直径要比需要的孔径稍微大一些。因此，钻孔的直径通常比使用的钻头的直径要小一些。对于 2mm 以内的孔径该差值为 50μm，对于较大的孔则为 100μm。对镀通孔板，该差值还必须包含电镀厚度。因此，直径为 1mm 的电镀孔必须使用直径为 1.1mm 的钻头。

以下是已经普遍公认的孔径容差，除非另有规定

$$D \leqslant 0.8\text{mm} \rightarrow \pm 0.05\text{mm};$$

$$D > 0.8\text{mm} \rightarrow \pm 0.1\text{mm}。$$

式中，D 为孔径。

在日常操作中一般叠放 3 ~ 4 块板子，每块板子厚 1.59mm，以便钻头同时进行钻孔。每堆都装有一块垫板，通常是没有铜箔的基板，以便钻能够正确穿过所有的板子。

为了便于精确钻孔，过孔和焊盘通常从中心蚀刻，这样可以较容易地找到钻孔的中心。当用手工操作从下面钻孔时，通常在上面用一个亮点指示出孔的位置。

10.4.9 盖板和垫板

在钻孔过程中使用盖板和垫板是为了防止钻在钻入和退出时产生毛头。盖板和垫板也可以在钻孔时清洁和冷却钻头。因此，正确选择盖板和垫板以及它们的材料是非常重要的。

1. 盖板

盖板的主要作用是防止在钻头定位时被损坏。另外，盖板也有助于避免顶层的铜基板表面损伤和产生铜毛头，减少孔和钻头的污染，并且防止钻孔机器造成压痕。

盖板有多种类型，合成铝、固态铝、三聚氰胺产品以及铝箔酚醛塑料都是最常用的。此外，合成铝不会在孔中留下杂质。另一方面，固态铝能够很好抑制毛头的产生，且没有杂质，但是小的钻头则更加容易断裂。酚醛塑料不是很贵，但是经常较易弯曲且在孔壁上留下杂质，这会给随后的工作带来问题。

薄盖板平铺于要钻孔基材的钻入面，如图 10-8 所示。

2. 垫板

垫板放置在要钻孔的电路板下面，它的作用是阻止出口处产生铜毛头，同时在钻孔终端为钻头提供足够的空间。优质的垫板应该不污染孔，且能帮助钻头冷却，从而提高孔的质量。

可供印制电路板使用的垫板材料有很多种。然而，只有很少被工程师指定为钻孔所用。典型的垫板材料有铝箔木芯复合板、三聚氰胺箔木芯复合板、固态酚醛塑料和纸质树脂硬板。

这种材料通常由压制的木料/纸浆混合做芯，用硬化的铝薄片包在它的两面。木质填充物不含树脂成分，它具有很强的吸收热量的能力，可以充当钻头的冷却剂。碎屑从硬化铝处排出，保持钻头横刃处洁净，螺旋退屑槽里没有环氧树脂残渣堆积。

如果正确选择钻孔的深度，钻孔不超过板子的中心，则垫板在两面均可使用。

垫板材料必须足够厚且平坦均匀。它不应含有研磨剂，那样将会增加钻头的磨损或可通过钻孔排除的污染物的产生。其表面应该光滑坚硬，且适当抑制出口处毛头的产生。

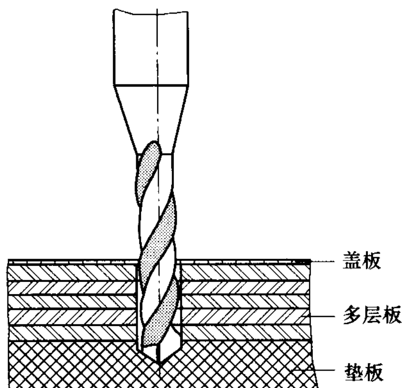


图 10-8　盖板和垫板的使用

10.4.10　钻套的使用

钻套在印制电路板钻孔过程中起着重要作用。其惟一的功用就是精确确定钻孔的位置。钻套由碳化钨材料制成，它用在需要最终精确确定位置时。钻套的直径必须和钻头的直径匹配，直径过大会使中心不准，钻孔错位。不恰当的操作会导致钻头刃带和横刃较大的磨损。钻套还能在钻头钻入时抑制入口处毛头的产生。钻套是一种高精度的工具（见图 10-9），其容差可以达到微米范围。

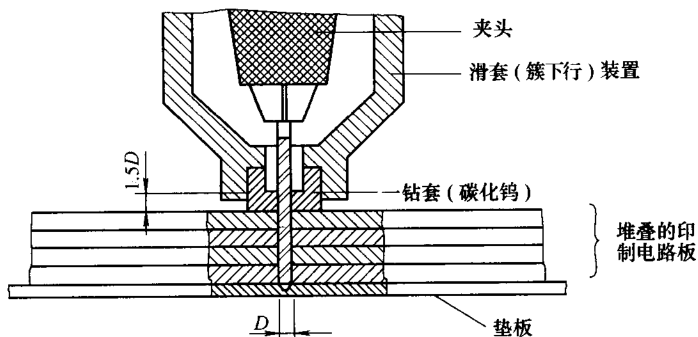


图 10-9　钻套的使用

10.4.11　钻孔和基板的类型

基板是按照技术要求的电性能和物理性能的标准制作的。钻孔的质量取决于树脂和基板支撑纤维的质量。常用的覆铜基板是 G-10、环氧玻璃/FR-4、聚酰

胺玻璃、酚醛玻璃、纸质酚醛、纸质环氧基、聚四氟乙烯和聚酰胺石英。

孔壁表面必须是光滑的。表面光洁程度依赖于钻头、钻速和进刀率的选择。如果这些参数选择不适当，会发生树脂胶渣粘污以及摩擦热量等问题。加固材料的碎片将会留在孔壁上，且在金属喷镀过程中起负作用。这将引起电镀金属高的孔隙度和电镀液高的吸水性和潮湿，在树脂胶渣上生成气孔。由于上述原因也可导致在焊接过程中形成吹孔。

钻孔过程中，基板的空间稳定性、翘曲、弯曲、扭曲这些性能是非常重要的。基板不平整通常会使孔的终端产生毛头。基板的编织类型和纤维厚度影响钻头偏离。钻头偏离过大会导致孔的质量降低。如果基板纤维好会使得钻头偏离较小。

钻头的选择必须与基板的类型相适应，以便获得高质量的钻孔。纸质酚醛基板应当使用顶角为100°的长麻花钻，而环氧玻璃基板要好一些，用顶角为120°的短麻花钻即可。然而这两种类型都要使用碳化钨钻头。

10.4.12 钻孔问题

不合格的孔的形成是由于钻头几何形状、钻孔速度、进刀率选择不恰当和基材处理不当造成的。以下是钻孔过程中需要注意的几个主要问题：

1）胶渣；

2）钻轴变热；

3）粗糙。

1. 胶渣

胶渣是指当树脂加热到超过它的溶点（115℃）时产生的污物。

2. 钻轴变热

这意味着钻孔速度和进刀率与钻头几何形状不平衡，因而使得孔壁过热。

3. 粗糙

由于钻头质量低，导致钻孔产生碎屑多、孔壁粗糙。

在钻孔过程中产生的碎屑必须沿着钻头退屑槽排出到表面，这需要选择合适的钻头、钻速和进刀率。如果碎屑不能排出，则会因为摩擦而加热生成胶渣，从而使基材涂污。这些污物将会残留在孔壁上，影响随后的电镀，并会引起电镀表面很高的孔隙度、电镀液的吸收性高和潮湿等，引起随后的焊接过程问题。在多层电路板中涂污将会带来更严重的问题，因为一些胶渣覆盖内层导电层的铜上，所以电镀的铜不能与通过钻孔暴露的铜连接，这样的板子为不合格产品。

然而，要电镀的孔也不是必须是非常光滑的，可以控制粗糙度，使其达到所要求的水平。一定的粗糙度还有助于提高基材孔壁上电镀铜的附着力。

10.4.13 钻孔机

钻孔机有两种类型：

1）人工控制钻孔机；

2）数控钻孔机。

少量的印制电路板钻孔可以使用单钻头人工控制钻孔机，而大量的印制电路板通常使用数控钻孔机。

钻孔机的选择依据是它的速度、生产能力、精度和价格。人工钻孔机需要操作人员将电路板定位，并起动钻头转动，而计算机数控钻孔机的定位和钻孔都由计算输入进行控制的。

尽管印制电路板钻孔机能够应用的设计范围很宽，但它们都有一个共同的特点，那就是对各种类型的基材都具有高速、有效、经济的钻孔能力。大多数使用速度范围为 20000～50000r/min，高性能的钻孔机可以达到 100000r/min。Hudson（2003）描述了可视的多钻头系统的发展状况，其运转速度可以达到 275000r/min，该机器能够实现每一个钻轴在各个方向上的独立控制。钻轴使用标准的杆直径为 0.125in（3.20mm）的无环钻（ringless drill），同时钻头使用寿命延长至 2～4 倍。可视系统可以为每一个钻轴提供完整的摄像。由于每一个钻轴都能够独立地定位在 x 轴和 y 轴上，所以就有可能单独地修改每一块板子的钻孔程序了。每一次钻轴工具的变化都可由可视系统重新计算记录，如果需要，还可以为整个钻孔过程提供时间控制。

10.4.13.1 人工控制钻孔机

人工控制钻孔机可通过以下两种方法之一对印制电路板钻孔定位：

1）直接目测方法；

2）光学方法。

这两种方法都要求确定孔的位置，可以采用与原图重叠的方法或是在电路板上重画电路图的方法。当显影图像足可以对钻孔定位，板子可以堆放或扣牢且与模板对齐时，经常使用光阻剂，模板通常由丙烯酸材料制作。板子可在操作员控制的铁笔下移动。

钻轴系统或高速转轴系统由轴承（径向或轴向）、发动机和钻轴、工具安装系统、跟踪系统和冷却系统构成。钻轴主要分成两部分：

1）球形轴承钻轴；

2）空气轴承钻轴。

球形轴承钻轴主要应用于不要求高精度或高转速（大于 15000 转）的场合。比较而言，空气轴承钻轴允许高速度和高精度运行，但是轴承振动要低。

10.4.13.2 直接瞄准固定冲床

这种机器由一个坚固的底座和一个支撑发动机的支柱构成。在钻孔时，通过控制杆控制钻头垂直移动，控制杆位于钻头的右边，还有另外一个小控制杆可以将钻头锁定。钻轴的旋转速度从 0 ~ 4500r/min 连续可调，尘粒由一个真空排放系统收集。

这种机器的操作非常简单，只需将板子手动定位于钻头尖部，然而其精度有限，通常不高于 ±0.25mm。

10.4.13.3 光学瞄准高速钻孔机

这种机器是在直接瞄准钻孔机的基础上改进而成的。钻轴安装在工作台下面，钻轴的速度范围为 15000 ~ 60000r/min，通过底部的夹具模进刀。底部的进刀和顶部的钳位通过一个气动的时间延迟电路控制和排序。整个排序受踏板的影响，进刀、时间延迟和转速的变化可以各自独立控制。

为了对准焊盘的钻孔中心，在工作台上装有一台光学放大镜（如图 10-10 所示），该放大镜与钻轴在同一直线上，其光学放大倍数为 10 倍。用卤素灯提供照明，其亮度可以调整，便于在屏幕上进行观察。瞄准点由屏幕上的同心圆和十字线组成，瞄准时将其对准焊盘中心，这样可以使精度达到 ±0.1mm。这种机器生产的孔精度高，并且孔的质量非常好。尘粒收集真空系统也可提供无尘环境。

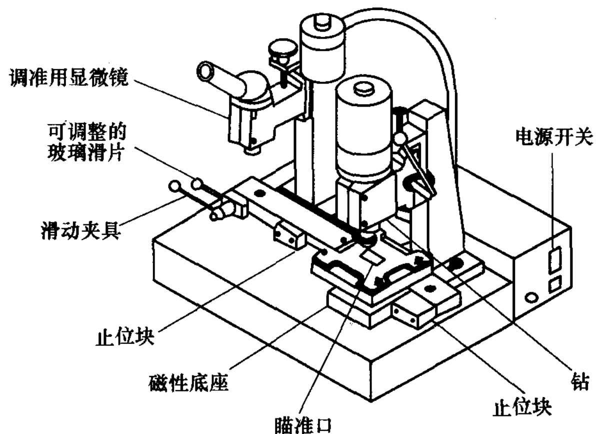


图 10-10 光学瞄准高速印制电路板冲床

10.4.13.4 数控钻孔机

在数控钻孔机中，机器的逻辑控制通过软件实现，计算机编程后控制机器。数控机器的优点是灵活、高速、功能强、可重复性好。

用数控钻孔机对大量印制电路板钻孔时通常使用多钻头钻孔机。机器的典型配置是有两个或更多钻头，每个钻头可以对叠放在一起的板子同时钻孔。模型板放在每一堆板子的上面和底部以保证钻孔一致。数控钻床能够自动调整钻头位置、钻速和进刀率，并且把板子正确放置于 x-y 坐标中进行钻孔。保留钻头的使用记录，以便在它们出现磨损迹象、横刃损坏以及切割边缘出现毛头时及时撤出。通常，小且便宜的钻头即可报废，大且昂贵的钻头则要进行翻磨。

CAD、后处理程序用来生产工具和操纵钻孔机器。多数情况下，工具以钻孔纸带的形式从准备好的 CAD 软件中直接获得，或者根据人工绘制的原图，通

过数字转换器得到。由数据库信息能够生成孔的尺寸和定位，可以用于制作和检测印制电路板。孔的尺寸被不同的符号编码，并在孔的设计图表中加以说明。然而，现代的CAD/CAM系统为无纸形式，计算机的数据能够直接用于印制电路板的制作，信息的传递是通过联机或其他现代传输媒介实现的。

10.5 微通孔

当今，为了增强市场竞争力，新型电子产品变的更小、更快、更轻和更便宜。人们运用密距区域阵列封装、密距球栅阵列封装和板上倒装芯片装配技术来达到这些要求。这些封装技术主要运用于高密度印制电路板技术中，大大缩小了导线的线宽和通孔的尺寸，而且成本相对较低。

高密度互连的真正好处在于称为“微通孔”的小孔。这些孔非常小，IPC定义其为直径不超过150μm的孔。小尺寸的孔为导线的布设提供了更大的空间。

微通孔通常仅仅连接印制电路板的两层，术语“捕获连线”用来表示微通孔顶层，而“目标连线”用来表示微通孔的底层。HDI通常用于标准双面板的最外层或是多层板的内层，用厚度为50～80μm的薄非增强树脂作电介质。大部分通孔通过光成像、激光切除、等离子蚀刻的方法制作，或通过在孔中填充导电油墨生成。

在印制电路板成孔中，超过90%的孔依然采用机械钻孔，至今还没有更好的制作微通孔的方法。对于直径为100μm以下的孔，现在可以采用的技术有三种：光致成孔、等离子蚀孔和激光成孔（Keeping，2000）。每一种都有它的优点和不足，市场调查显示激光成孔在微通孔生产领域的应用最为广泛。

10.5.1 光致成孔

光敏材料应用在电路图板的两面，普通阻焊剂通过帘式淋涂、丝网印制或甚至干膜涂覆等各种技术也同样应用在电路图板的两面。微通孔在光敏层（电介质层）成像和显影，该层是完全固化的。在接下来的过程中，导电的铜层经过全加成法沉积，铜层的图样就被定像和刻蚀了。

光致成孔过程最困难的问题是在固化过程中，当孔形成后电介质材料收缩。对于多基板来说，通常应最少准备2～3张同一图样的原图，每一张尺寸稍有不同。世界上只有少数几个厂商采用光致成孔技术，且大部分集中在日本。

10.5.2 等离子蚀孔

等离子蚀孔的方法是向等离子腔内注入混合气体，然后用射频电源将其激发成等离子状态，这时气体的原子和分子分裂成离子，在指定的电介质中与有

机材料发生反应。剩余的铜箔即为金属覆膜，随后通过钻孔、电镀、外层成像等流程形成标准产品。经过标准的成像和蚀刻过程后，微通孔处的铜被除去，再使用真空舱的等离子钻头对暴露的介质层进行蚀刻。

等离子蚀刻只能用在极不稳定的材料上，例如无粘结剂柔性聚酰亚胺、纯树脂和增强芳香族聚亚胺基板，不能用于环氧玻璃布/纤维材料，如 FR-4。涂树脂铜箔（RCC）被碾压在双面板或多基板中间层的两面。

Buckly 介绍了另一种印制电路板的制造技术，就是用等离子蚀刻的方法制作非常小的孔，这意味着互连密度的提高。电浆蚀孔增层法的制作过程是用覆 Cu 聚酰亚胺代替传统印制电路板基材，用等离子干法蚀刻代替传统的机械钻孔，这样能够同时生产数千个小直径的（$<80\mu m$）孔，且没有尘粒或污物。这些小直径的孔只能在薄的基板上制作，而不能在传统的印制电路板基板上制作。因此电浆蚀孔增层法采用了覆 1/2oz（$17\mu m$）铜的 $25\mu m$ 厚的聚酰亚胺基板。由于这种基板很薄，典型的 $75\mu m$ 孔的纵横比在电镀上没有丝毫问题，采用这种技术，$100\mu m$ 或更小直径的孔需要的焊盘直径仅为 $200\sim300\mu m$。小焊盘与 $100\mu m$ 以下线宽的使用促进了互连密度的提高。Brist 等人（1997）详细地介绍了用等离子蚀刻技术进行微通孔制作的方法。

10.5.3 激光成孔

近年来，使用激光技术生产微通孔和芯片级封装器件一样，已经成为高密度互连系统的首选。这已经成为了当今便携式电子产品发展的必然趋势，它能使其性能更小、更轻、更薄、更快，功能更全。激光技术在柔性和刚性电路板的微通孔制作中均可适用。

"laser" 这个词是下面词组中的第一个字母的集合，"light amplification by stimulated emission of radiation"（"受激辐射的光放大"）。虽然是放大器的缩写，但是 "laser" 通常用作光发生器，然而这种光与常规光源产生的光完全不同。激光束具有空间和时间相干性，并且为单色光（只有一个波长）。这种光束有很强的方向性和很高的能量密度，其聚焦性也很好。

激光在机械操作中主要用于材料加工方面，比如切割、焊接、打孔和修整，不同的激光类型用在不同的材料上，如金属、陶瓷、塑料等。使用激光相对于其他传统方法的优势在于① 高速度；② 无机械磨损和断裂；③ 可以加工很小的孔。激光束不被空气吸收，在固定或移动的反光镜帮助下能够直接指向工作点。$1\mu m$ 或更小波长的激光光束可通过光纤定向。

二氧化碳（CO_2）激光器、钇-铝-石榴石（YAG）激光器和准分子激光器是当今主要应用的激光器。CO_2 激光和 YAG 激光能够提供最大的输出能量，并且具有极好的聚焦性，可以汽化或熔化材料。准分子激光器发射紫外线激光（代

替 CO_2 激光器的红外线激光），特别是在微型区域的加工方面开辟了新的途径。准分子激光器已逐渐被人们所接受，可以直接使用，也可以作为 YAG 激光器的光源。

图 10-11 给出了不同激光的波长，图 10-12 表示不同材料对于不同波长的光的吸收性能。

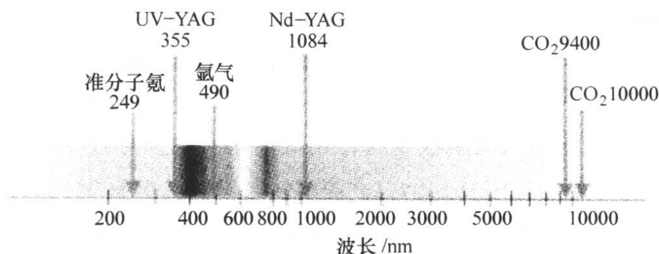


图 10-11　不同激光的波长

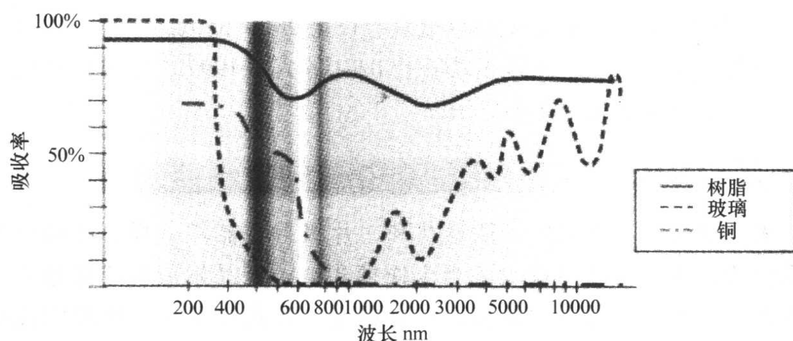


图 10-12　激光的波长及其吸收性能

10.6　紫外线激光器在印制电路板钻孔中的应用

当前用于制作印制电路板微通孔的激光器有四种类型：CO_2 激光器、YAG 激光器、准分子激光器和铜蒸气激光器。CO_2 激光器典型地用于生产大约 75μm 的孔，但是由于光束会从铜面上反射回来，所以它仅仅适合于除去电介质。CO_2 激光器非常稳定、便宜，且不需维护。准分子激光器是生产高质量、小直径孔的最佳选择，典型的孔径值为小于 10μm。这些类型最适合用于微型球栅阵列封装（microBGA）设备中聚酰亚胺基板的高密度阵列钻孔。铜蒸气激光器的发展尚在初期，然而在需要高生产率时仍具有优势。铜蒸气激光器能除去电介质和铜，然而在生产过程中会带来严重问题，会使得气流只能在受限的环境中生产产品。

在印制电路板工业中应用最普遍的激光器是调 QNd：YAG 激光器，其波长为 355nm，在紫外线范围内。这个波长可以在印制电路板钻孔时使大多数金属（Gu，Ni，Au，Ag）融化，其吸收率超过 50%（Meier 和 Schmidt，2002），有机材料也能被融化。紫外线激光的光子能量可高达 3.5 ~ 7.5eV，在融化过程中能够使化学键断裂，部分通过紫外线激光的光化学作用，部分通过光热作用。这些性能使紫外线激光成为印制电路板工业应用的首选。

YAG 激光系统有一个激光源，提供的能量密度（流量）超过 $4J/cm^2$，这个能量密度是钻开微通孔表面铜箔所必需的。有机材料的融化过程需要的能量密度大约只有 $100mJ/cm^2$，例如环氧树脂和聚酰亚胺。为了在这样宽的频谱范围正确操作，需要非常准确和精密的控制激光能量。微通孔的钻孔过程需要两步，第一步用高能量密度激光打开铜箔，第二步用低能量密度激光除去电介质。

激光的波长为 355nm 时，其典型的光点直径大约为 20μm。在脉冲时间小于 140ns 时，激光的频率在 10 ~ 50kHz 之间，这时的材料是不会产生热量的。

图 10-13 给出了这种系统基本的原理图。通过计算机控制扫描器/反射系统定位激光束，通过焦阑透镜聚焦，可以使得光束以正确的角度钻孔。扫描过程通过软件产生一个矢量模式，以补偿材料和设计的偏差。扫描面积为 55 × 55mm。这个系统与 CAM 软件兼容，支持所有常用的数据格式。

激光系统是德国人 M/s LPKF 提出的，其机械设计的基座是将坚硬的花岗岩，其表面磨光精度不低于 3μm。工作台支座放置在气体轴承上，由线性发动机来控制。定位的准确性由玻璃标尺来控制，其可重复性确保在 ±1μm。工作台本身安装了光学传感器，可以在不同的反射点对激光位置进行精确调整，补偿光学变形和长期漂移的偏差。调整后，由软件所产生的一系列修正数据，可覆盖整个扫描区域。漂移刻度补偿大约需要 1min 的时间进行操作。基板的任何变化，例如位置偏离基准，可以通过高分辨率的 CCD 相机检测到，通过软件控制进行补偿。

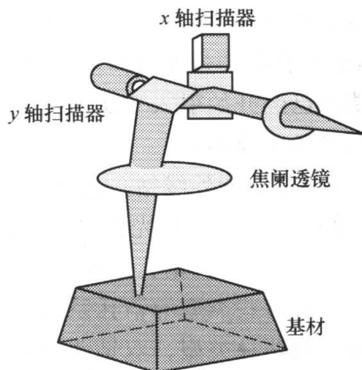


图 10-13 激光扫描系统的基本原理
（经 Meier 和 Schmidt 同意重绘，2002）

这种系统非常适用于原型的生产，因为它能够钻孔和构形，从柔性到刚性印制电路板均可使用，包括金属聚合物，如阻焊剂、保护层、电介质等。Raman 等人（www. esi. com）介绍了最先进的固态紫外线激光系统，以及其在高密度互连微通孔生产中的应用。

Lange 和 Vollrath（www. lpkfusa. com）解释了紫外线激光系统（微线钻孔

600 系统）在钻孔、构形和切割中的各种应用。该系统可以钻孔和微通孔，铜层孔径减小到了 30μm，并且对于一定范围内的基材能进行单步操作，这种系统也能生产最小宽度为 20μm 的印制电路板外层导线，其生产能力大大超过了光化学。这种系统的生产速度可高达 250 钻的操作，并能够允许所有标准输入，例如 Gerber 和 HPGL。它的操作面积是 640mm×560mm（25.2in×22in），最大的材料高度为 50mm（2in）；可适用于大部分常用基板。机器工作台的基座和它的导轨都是用天然的花岗岩制作的，精确度为 ±3μm。工作台由线性驱动器驱动，由空气轴承支撑；位置由具有热量补偿的玻璃标尺控制，其精度为 ±1μm。操作台上基板的安装是通过真空设备完成的。

10.7 混合激光钻孔过程

商业生产中，有两种激光技术可用于激光钻孔。CO_2 激光波长在远红外线波段内，紫外线激光波长在紫外线波段内。CO_2 激光广泛应用在印制电路板的工业微通孔制作中，要求微通孔直径大于 100μm（Raman，2001）。对于这些大孔径孔的制作，CO_2 激光具有很高的生产力，这是因为 CO_2 激光制作大孔所需的冲孔时间非常短。紫外线激光技术广泛应用在直径小于 100μm 的微孔制作中，随着微缩线路图的使用，孔径甚至可小于 50μm。紫外线激光技术在制作直径小于 80μm 的孔时产量非常高。因此，为了满足日益增加的微孔生产力的需求，许多制造商已经开始引入双头激光钻孔系统。以下就是当今市场用双头激光钻孔系统的三种主要类型：

1）双头紫外线钻孔系统；

2）双头 CO_2 激光钻孔系统；

3）混合激光钻孔系统（CO_2 和紫外线）。

所有这些类型的钻孔系统都有其自身的优点和缺点。激光钻孔系统可以简单地分成两种类型，双钻头单一波长系统和双钻头双波长系统。不论是哪种类型，都有两个主要部分影响钻孔的能力：

1）激光能量/脉冲能量；

2）光束定位系统。

激光脉冲的能量和光束的传递效率决定了钻孔时间，钻孔时间是指激光钻孔机钻一个微通孔的时间，光束定位系统决定了在两个孔之间移动的速度。这些因素共同决定了激光钻孔机制作给定要求的微通孔的速度。

双头紫外线激光系统最适于用在集成电路中小于 90μm 的钻孔，同时其纵横比也很高。

双头 CO_2 激光系统使用的是调 Q 射频激励 CO_2 激光器。这种系统的主要优

点是可重复率高（达到了 100kHz）、钻孔时间短、操作面宽，只需要射很少几下就可以钻一个盲孔，但是其钻孔质量会比较低。

使用最普遍的双头激光钻孔系统是混合激光钻孔系统，它由一个紫外线激光头和一个 CO_2 激光头组成。这种综合运用的混合激光钻孔方法可以使铜和电介质的钻孔同时进行。即用紫外线钻铜，生成所需要孔的尺寸和形状，紧接着用 CO_2 激光钻无遮盖的电介质。钻孔过程是通过钻 2in × 2in 的块完成的，此块叫做域。

CO_2 激光有效地除去电介质，甚至是非均匀玻璃增强电介质。然而，单一的 CO_2 激光不能制作小孔（小于 75μm）和除去铜，也有少数例外，那就是它可以除去经过预先处理的 5μm 以下的薄铜箔（Justino，2002）。紫外线激光能够制作非常小的孔，且可以除去所有普通的铜箔（3 ~ 36μm，1oz，甚至电镀铜箔）。紫外线激光也可以单独除去电介质材料，只是速度较慢。而且，对于非均匀材料，例如增强玻璃 FR-4，效果通常不好。这是因为只有能量密度提高到一定程度，才可以除去玻璃，而这样也会破坏内层的焊盘。由于混合激光系统包括紫外线激光和 CO_2 激光，因此其在两个领域内都能达到最佳，用紫外线激光可以完成所有的铜箔和小孔，用 CO_2 激光可以快速地对电介质进行钻孔。

图 10-14 给出了可编程钻距的双头激光钻孔系统的结构图，两个钻头之间的间距可根据元器件的布局自行调整，这保证了最大的激光钻孔能力。

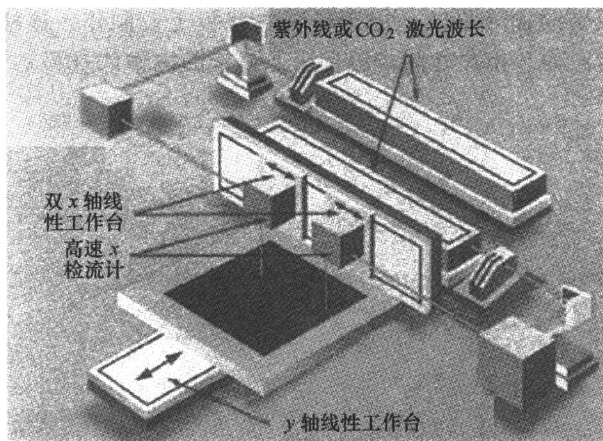


图 10-14 双头激光钻孔系统的结构（经 Raman 同意重绘，2001）

现在，大多数双头激光钻孔系统中两个钻头之间的间距都是固定的，同时具有步进-重复光束定位技术。步进-重复激光远程调节器本身的优点是域的调节范围大（达到了（50 × 50）μm）。缺点是激光远程调节器必须在固定的域内步进移动，而且两个钻头之间的间距是固定的。典型的双头激光远程调节器两个钻头之间的距离是固定的（大约为 150μm）。对于不同的面板尺寸，固定距离的

钻头不能像可编程间距的钻头那样以最佳配置完成操作。

如今，双头激光钻孔系统有着各种不同规格的性能，既能够适用于小型印制电路板制造厂商，同时也适用于大批量生产的印制电路板制造厂商。

由于陶瓷氧化铝有很高的介质常数，因此用于制造印制电路板。然而，由于其易碎、布线和装配时所需的钻孔过程用标准工具就很难完成，因为此时机械压力必须减小到最小，这对激光钻孔却是一件好事。Rangel 等人（1997）证明对于氧化铝基板以及覆有金和铬的氧化铝基板，可使用调 QNd：YAG 激光器进行钻孔。使用短脉冲、低能量、高峰值功率的激光器有助于避免机械压力对样本的破坏，能够制造出孔径小于 100μm 的优质通孔。这种技术成功地应用在低噪声微波放大器中，其频率范围为 8～18GHz（Betancourt 等人，1996）。

10.8 几个常用标准

1）IPC-Dr-572：印制电路板钻孔指南。为提高多种印制电路板材料的钻孔质量提供指南；

2）IT-95080：印制电路板通孔机加工方案的改进和优选手册。对小的机械钻孔定义及性能优选，讨论机械钻孔技术的改进；

3）IPC-NC-349：钻床和铣床的计算机数控格式。定义一个计算机数控钻床和铣床机械可识别的输入格式，用于印制电路板工业制作。该格式可在印制电路板设计者、生产商和用户之间传输钻床和铣床的操作信息。

第11章 多 基 板

11.1 什么是多层

多层或多层印制电路板是由两层以上的导电层（铜层）彼此相互叠加组成的电路板。铜层被树脂层（半固化片）粘接在一起。多基板是印制电路板中最复杂的一种类型。由于制造过程的复杂性、较低的生产量和重做的困难，使得它们的价格相对较高。

由于集成电路封装密度的增加，导致了互连线的高度集中，这使得多基板的使用成为必需。在印制电路的版面布局中，出现了不可预见的设计问题，如噪声、杂散电容、串扰等。所以，印制电路板的设计必须致力于使信号线长度最小以及避免平行路线等。显然，在单面板中，甚至是双面板中，由于可以实现的交叉数量有限，这些需求都不能得到满意的答案。在大量互连和交叉需求的情况下，电路板要达到一个满意的性能，就必须将板层扩大到两层以上，因而出现了多层电路板。因此，制造多层电路板的初衷是为复杂的和/或对噪声敏感的电子电路选择合适的布线路径提供更多的自由度。

多层电路板至少有三层导电层，其中两层在外表面，而剩下的一层被合成在绝缘板内。它们之间的电气连接通常是通过电路板横断面上的镀通孔实现的。除非另行说明，多层印制电路板和双面板一样，一般是镀通孔板。

多基板是将两层或更多的电路彼此堆叠在一起制造而成的，它们之间具有可靠的预先设定好的相互连接。由于在所有的层被碾压在一起之前，已经完成了钻孔和电镀，这个技术从一开始就违反了传统的制作过程。最里面的两层由传统的双面板组成，而外层则不同，它们是由独立的单面板构成的。在碾压之前，内基板将被钻孔、通孔电镀、图形转移、显影以及蚀刻。被钻孔的外层是信号层，它是通过在通孔的内侧边缘形成均衡的铜的圆环这样一种方式被镀通的。随后将各个层碾压在一起形成多基板，该多基板可使用波峰焊接进行（元器件间的）相互连接。

碾压可能是在液压机或在超压力舱（高压釜）中完成的。在液压机中，准备好的材料（用于压力堆叠）被放在冷的或预热的压力下（高玻璃转换温度的材料置于170～180℃的温度中）。玻璃转换温度是无定形的聚合体（树脂）或部分的晶体状聚合物的无定形区域从一种坚硬的、相当脆的状态变化成一种粘性的、橡胶态的温度。

多基板投入使用是在专业的电子装备（计算机、军事设备）中，特别是在重量和体积超负荷的情况下。然而这只能是用多基板的成本增加来换取空间的增大和重量的减轻。在高速电路中，多基板也是非常有用的，它们可以为印制电路板的设计者提供多于两层的板面来布设导线，并提供大的接地和电源区域。

11.2 互连技术

11.2.1 传统的镀通孔

最普通的、最廉价的层间互连技术是传统的镀通孔技术。图 11-1 为一个六层镀通孔板的实例。

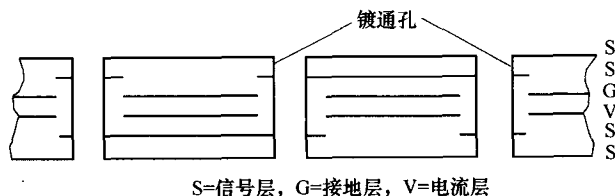


图 11-1 传统的多基板：信号层、接地层和电源层

在这项技术中，所有的钻孔都要穿通面板，不管它们是否像元器件孔一样或像过孔一样被应用。这项技术的主要缺点是通孔要占用所有层的珍贵空间，而不考虑该层是否需要进行电气连接。

11.2.2 埋孔

埋孔是连接多基板的两层或更多层的镀通孔，埋孔处于电路板的内层结构中，不出现在电路板的外表面上。图 11-2 为具有埋孔的多基板。

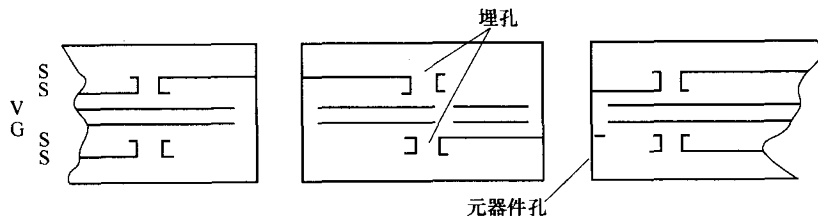


图 11-2 具有埋孔的多基板

与传统的镀通孔结构相比，埋孔节约了很大的空间。当信号线密度很大，需要更多的孔位连接信号层，也需要更多的信号走线通路的时候，可采用埋孔技术。然而，因为埋孔技术需要更多的程序步骤，所以线路密度的优点是增大

电路板的成本。

11.2.3　盲孔

盲孔是将多基板的表层连接到一层或更多层的镀通孔，它们不穿过板的全部厚度。图 11-3 为典型盲孔技术的实例。在多基板的双面上都可以使用盲孔，盲孔可以连接过孔和穿过电路板的元器件孔。

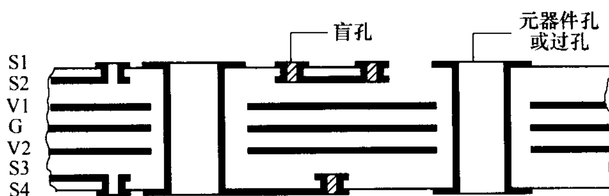


图 11-3　具有盲孔的多基板

盲孔可以在板层上彼此堆叠，并且能被做得更小，这样就可以提供更多的空间或布设更多的信号线。

对于 SMD 和连接器而言，盲孔技术格外有用，因为它们不需要大的元器件孔，只需要小的过孔将外表面与内层相接。在非常密集且厚的多基板上，通过使用表面贴装技术可以减轻重量，也为设计者提供了充分的设计空间。

11.3　多基板材料

制造传统的刚性多基板的三种主要原始材料是：① 树脂；② 增强材料；③ 金属箔。电路板通常使用玻璃布来制做，用树脂作为电介质材料进行覆膜或填充。玻璃布给电路板提供机械强度，它的基本功能是承载树脂。玻璃布的厚度可以控制，从而使制造商能够控制整个多基板的厚度和公差。

11.3.1　树脂

在多基板中，以下三种类型的树脂应用最广泛：

1）传统的耐火环氧树脂；

2）改良的高性能、高温度的环氧树脂；

3）聚酰亚胺薄膜。

1. 传统的环氧树脂

这是一种最广泛应用的树脂，并且适合大多数商业的和军用的使用需求。在处理期间，它能极好的粘接铜箔，收缩率低，并且有好的抗化性和阻湿性。然而，当加热到焊锡温度时，它的膨胀比率较高。它的玻璃转化温度（T_g）的范围为 120 ~ 130℃。

2. 改良的环氧树脂

由于它们具有改良的分子结构，这些环氧树脂提高了玻璃转化温度，并且改善了抗化性和热应力阻抗。缺点是增加了脆性和钻头的磨损，以及较高的材料成本。

3. 聚酰亚胺树脂

聚酰亚胺树脂具有高达200℃的极好的热稳定性，对于大而昂贵的电路板的维修来说，这是个极其有用的性能。它们能经受住反复的焊接和重焊操作，有高的铜与树脂的粘接强度和较少的钻污。然而，它们的缺点是其具有高吸湿性，低易燃等级和较高的成本。

11.3.2 增强材料

最广泛应用的增强材料是电绝缘玻璃：使用玻璃纤维布作为环氧树脂的支撑工具。这种材料防水性好、防碱性好而抗酸性较差，尺寸稳定性也较高。玻璃纤维布可应用于各种各样的磨损类型中。用3～4个数字编号指定了玻璃纤维布的类型，确定了它的标称重量、厚度和织数。

11.3.3 预浸材料

半固化玻璃纤维增强环氧树脂被用作预浸材料或B阶段。在这一阶段，环氧树脂不是完全的聚合状态。在热度和压力的作用下，它可以更好地粘接多基板材料。通常，电路板的制作使用较薄的结构，这是因为它们具有较高的树脂-玻璃比率，从而可以进行无空隙的层压结合，在铜被蚀刻的地方，有更多可利用的树脂填充电路图形。

11.3.4 铜箔

用来制造多基板的铜箔通常通过电解沉积过程制造。随着电路密度的增加，导致更细的电路走线和更厚的电路板。对于环氧树脂和聚酰亚胺树脂，在温度提高和特殊的粘接过程中，铜箔必须具有更好的延伸性能。为了具有高分辨率和细的电路走线，铜箔正在向超薄（小于12μm）方向发展。

不同层的基板的选择是以阻抗、所设计的信号层隔离需要和放置在总的层压板厚度上的物理限定为基础的（www. thinktink. com）。以印制电路板最常用的基板材料FR-4为例，关键的考虑如下：

1）对于总厚度为0.063in（1.6mm）的四层电路板的设计而言，在电路板的两面覆盖0.0007in（0.017mm）厚的铜箔（因此被称为“半盎司/半盎司”或“一半的一半”铜箔），而最里面的印制电路板最好选择厚度为0.025in（0.64mm）的基板。

2）外层结构为0.017in（0.43mm）厚的基板，一面覆有半盎司的铜箔。所用的基板是由玻璃纤维布以及起支撑作用的部分硬树脂构成的，硬树脂在多基板的层压过程中会重新熔化，因而变得很粘，将内基板粘接。这就是多基板内层的粘接原理。

11.4 多基板的设计性能

多基板的设计性能大多数与单基板或双基板类似，那就是注意避免使太多的电路塞满太小的空间，从而造成不切实际的公差、高的内层容量、甚至可能危及产品质量的安全。因此，性能规范应该考虑内层线路的热冲击、绝缘电阻、焊接电阻等的完整的评估。以下内容叙述了多基板设计中应考虑的重要因素。

11.4.1 机械设计因素

机械设计包括选择合适的板尺寸、板的厚度、板的层叠、内层铜箔、纵横比等。

11.4.1.1 板尺寸

板尺寸应根据应用需求、系统箱尺寸、电路板制造者的局限性和制造能力进行最优化选择。大电路板有许多优点，例如较少的基板、许多元器件之间较短的电路路径，这样就可以有更高的操作速度，并且每块板子可以具有更多的输入输出连接，所以在许多应用中应首选大电路板，例如在个人计算机中，看到的都是较大的母板。然而，设计大板子上的信号线布局是比较困难的，需要更多的信号层或内部连线或空间，热处理的难度也较大。因此，设计者一定要考虑各种因素，例如标准板尺寸、制作设备的尺寸和制作过程的局限性。在IPC-D-322中给出了关于选择标准的印制电路/板尺寸的一些指导原则。

11.4.1.2 板厚度

多基板的厚度是由多种因素决定的，例如信号层的数目、电源板的数量和厚度、优质打孔和电镀所需的孔径和厚度的纵横比、自动插入需要的元器件引脚长度和使用的连接类型。整个电路板的厚度由板子两面的导电层、铜层、基板厚度和预浸材料厚度组成。在合成的多基板上获得严格的公差是困难的，大约10%的公差标准被认为是合理的。

11.4.1.3 板的层叠

为了将板子扭曲的几率减到最小，得到平坦的完成板，多基板的分层应保持对称。即具有偶数铜层，并确保铜的厚度和板层的铜箔图形密度对称。

通常层压板使用的构造材料的径向（例如，玻璃纤维布）应该与层压板的边平行。因为粘接后层压板沿径向收缩，这会使电路板的布局发生扭曲，表现

出易变的和低的空间稳定性。

然而，通过改善设计可以使多基板的翘曲和扭曲达到最小。通过整个层面上铜箔的平均分布和确保多基板的结构对称，也就是保证预浸材料相同的分布和厚度，可达到减小翘曲和扭曲的目的。铜和碾压层应该从多基板的中心层开始制作，直到最外面的两层。规定在两个铜层之间的最小的距离（电介质厚度）是 0.089mm。

由经验可知，两个铜层之间的最小距离，也就是粘接之后预浸材料的最小厚度必须至少是被嵌入的铜层厚度的两倍。换一句话说，两个邻近的铜层，如果每一层厚度是 30μm，则预浸材料的厚度至少是 2（2×30μm）=120μm，这可通过使用两层预浸材料实现（玻璃纤维织布的典型值是 1080）。

11.4.1.4　内层铜箔

最常使用的铜箔是 1oz（每平方英尺表面区域的铜箔为 1oz）。然而，对于密集的板子，其厚度是极其重要的，需要严格的阻抗控制，这种板子需要使用 0.5oz 的铜箔。对于电源层和接地层，最好选用 2oz 或更重一点的铜箔。然而，蚀刻较重的铜箔会导致可控性降低，不容易实现所期望的线宽和间距公差的图样。因而，需要特殊的处理技术。

11.4.1.5　孔

根据元器件引脚直径或对角线的尺寸，镀通孔的直径通常保持在 0.028～0.010in 之间，这样可以确保足够的体积，以便进行更好的焊接。

11.4.1.6　纵横比

“纵横比”是板的厚度与钻孔直径的比值。一般认为 3:1 是标准的纵横比，虽然像 5:1 的高纵横比也是常用的。纵横比可通过钻孔、除胶渣或回蚀和电镀等因素确定。当在可生产的范围内保持纵横比时，过孔要尽可能的小。

11.4.2　电气设计因素

多基板是高性能、高速度的系统。对于较高的频率，信号的上升时间减少，因而信号反射和线长的控制变得至关重要。多基板系统中，对于电子元器件可控阻抗性能的要求很严格，设计要满足以上要求。决定阻抗的因素是基板和预浸材料的介电常数、同一层面上的导线间距、层间介质厚度和铜导体厚度。在高速应用中，多基板中导体的层压顺序和信号网的连接顺序也是至关重要的。

介电常数：基板材料的介电常数是确定阻抗、传播延迟和电容的重要因素。使用环氧玻璃的基板和预浸材料的介电常数可通过改变树脂含量的百分比进行控制。

环氧树脂的介电常数为 3.45，玻璃的介电常数为 6.2。通过控制这些材料的百分率，环氧玻璃的介电常数可能达到 4.2～5.3。基板的厚度对于确定和控制

介电常数就是一个很好的说明。

介电常数相对较低的预浸材料适合应用于射频和微波电路中。在射频和微波频率中，较低的介电常数造成的信号延迟较低。在基板中，低损耗因素可使电损失达到最小。

预浸材料 ROR 4403 是 ROGERS 公司生产的一种新型材料（http://www.rogers-corp.com/mwu/index/html）。这种材料和在标准多基板（FR-4 材料）结构中使用的其他基板（例如，微波板使用的 RO 4003 或 RO 4350）相互兼容。

11.5　多基板的制造过程

11.5.1　一般过程

多基板的生产是通过使用预浸材料把内基板和外基板粘接在一起的。作为早期的解释，预浸材料是用部分硬树脂注入的玻璃纤维织布。把独立的层排列在压力设备中并进行粘接，以防止各层对不准。

粘接之后，被粘接的层还要进一步生产为双面镀通孔电路板。钻孔期间，由于环氧树脂在钻孔处留有污点，在通孔电镀之前，需要清洗通孔壁。

在多基板中，外层可能由铜箔和预浸材料组成，或由单面或双面覆铜基板组成。内层是由经过双面覆铜、刻蚀（制作设计好的导线）和镀通的基板材料组成的。

内层的蚀刻是用标准的印制电路技术制作的。粘接之前，为了预防想要的孔被遮蔽，对每一层进行非常仔细的布局设计是很重要的。B 阶段的每层和基板需要有不同的孔排列。为了防止树脂流入排列插脚，在预浸材料上加工和校正的孔径必须比导体焊盘的直径大 1.25mm。另一方面，基板上的孔径必须比放置在它们之上的焊盘小 1.25mm。

下面以四基板结构为例来说明这一过程。在图 11-4 中显示了这个过程的步骤。它们主要由两个单面基板和一个有两层预浸材料薄片的双面基板组成。这个过程的开始要制作所有需要的板的夹层结构，然后按照从底到顶的次序堆叠。

1）绝热材料（a）控制温度上升率；

2）底部基板设备或后部板（b）；

3）释放材料薄片（c），例如聚四氟乙烯玻璃纤维织布；

4）底层电路板（d）；

5）预浸材料（e）；

6）内层电路板（f）；

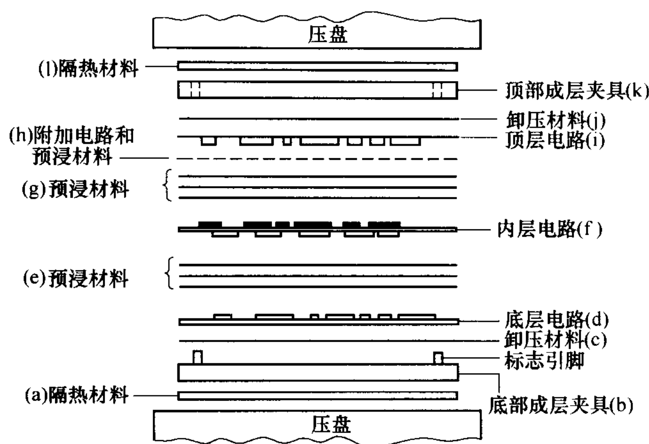


图 11-4　多基板成层的堆叠过程

7）预浸材料（g）;
8）顶层电路板（与 d 一样的 h）;
9）释放材料薄片;
10）顶部成层设备;
11）绝热材料。

11.5.2　成层

在层压压力机中进行的粘接与覆铜基板的制造类似，排列完不同的层以后，各压层之间构成三明治结构。根据预浸材料的性能，成层需要详细而精确的时间/温度/压力周期。

在成层期间，当加压时，树脂由于高温而变软；它在板之间流动填满所有的空白之处。同时，由于发生聚合反应，材料硬化，这样两个内层铜层就很好地嵌入在树脂中，形成了单一的、结实的板面。

粘接压力是 150 ~ 300N/cm^2。根据使用的预浸材料的类型、层数和压力堆的厚度选定处理温度和时间。

在超压力舱（高压釜）中，使用气体或油类来传送压缩力，并加热压力堆。压力堆以层叠的状态被放置在平台上，平台上有一个真空设备接头、密闭的真空温度和抗压箔。一旦压力舱被填满，它就被关闭，并且注入惰性气体和油类。均衡的粘接压力（在所有的方向压力应尽量均匀）是 80 ~ 200N/cm^2。图 11-5 所示为多基板原型设计的典型成层压力。

与水压相比，在压力舱中不同压力大小可能同时粘接。这种粘接方法的优点是提高了热传递，并具有更好的热时间梯度。压力的全面应用对多层堆有特

别积极的影响。它防止树脂流动，在玻璃纤维织布中，树脂流动是压力的主要原因。如果没有这种自然的压力，空间稳定性、扭曲/翘曲和厚度公差都会得到极大的提高。而且，在板中将不产生树脂短缺。对于真空粘接（压力室压力、真空结构或真空高压釜）需要较低的粘接力。在有较低粘接力的多基板中，产生的压力较少，这使得内层空间具有相当好的稳定性，改善了厚度公差，并减少了内层的对准偏差。因为，在真空室中熔点降低了，这样就可以制成挥发性元器件，包括实现了无孔的多基板。

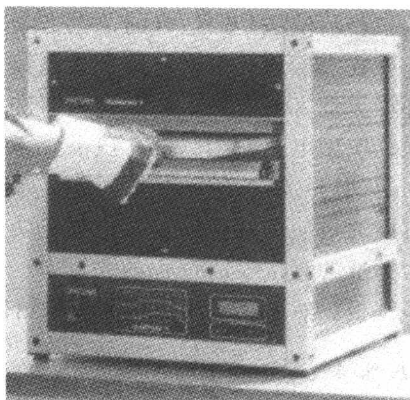


图 11-5　多基板原型设计的典型成层压力（Muller，2000）

在粘接期间，为了使多基板的不同覆铜层按照布局设计达到一个精确的排列，需要一个定位系统，这个定位系统可通过在产品板中或在个别层中钻一些定位孔来完成。惟一例外的是在四层多基板中使用浮动粘接。这包括内层预浸材料和铜箔的粘接，对外层也使用同样的方法。在多基板的定位孔中，内层的孔位（定位标记）可通过铣和钻完成。每一个生产步骤都影响着多层印制电路板的内层定位。随和层数增加和焊盘尺寸减小，错误定位的概率响应增加。Hinton（1992）阐述了在多基板中解决内层定位问题的多种方法。

粘接多基板时，温度的冷却率必须要尽可能地小。因为当在压力堆中，太大的温度梯度会引起最外层和最里层之间产生不同的收缩率，从而引起了多基板的变形。在极端情况下，可以关闭压力冷却系统，使多基板的冷却时间达到12h 或更多。

11.5.3　成层后期处理

从模具中取出之后，要按照设计需求对基板进行绝缘性检查。板也可能通过 X 射线进行检测。然后，裁齐多余的材料和钻孔，调整钻孔的供电和速度，使得毛刺和环氧污点达到最少。

在多基板的钻孔进行电镀之前，孔壁必须很好地清理。这是因为钻孔时可能会使树脂温度上升到玻璃转换温度以上，变软的树脂由于钻的冲击会涂污内层铜的末端表面。一定去除涂污层，在孔壁表面仅有铜层出现，从而更好地完成内层间的互连，不使任何一条连接受阻。涂污层的厚度一般是 2 ~ 6μm，但是，如果钻孔的参数选择不恰当，涂污层的厚度可能会达到 12μm。孔壁清洗可以使用化学方法或等离子体去污来完成。在各种可用的化学方法中，高锰酸钾

的三步清洗法是最适合的，也是应用最普遍的方法。

在多层通孔中，使用直接电镀法对不同导线层之间进行电气连接是一种对环境无危害的方法。一旦孔被清洗之后，使用碳粉或钯（对环境没有影响）镀膜，应用电流使金属铜从硫酸铜溶液中沉积在孔上。该铜层在不同的导线层之间起到连接器作用，并加固外部导线。对于基底而言，通孔电镀属于微波工程，可以通过使用标准的直接电镀的方法完成。一些基底需要额外的蚀刻过程，作为标准的直接电镀过程的一部分。使用类似的方法，可以制造出有许多内层的多基板。然而，对于层数较多的情况，生产场地和价格成为了主要的限制因素。

11.5.4 多层打孔

用自动设备对双面板和多层印制电路板的覆铜层的打孔技术是一样的，如果多基板设计包括埋孔或盲孔，还需要更多的打孔步骤。

11.5.5 多基板层叠规则

按照表 11-1 中规则进行多基板的层叠设计（经印制电路板股份有限公司允许）。

表 11-1 多基板层叠

例：04_188_FR-4_L41.35_71.18_p10_20_v1.99_2-3_4-5_6-7_s0

a	b	c	d	e	f	g + h + i
04	188	FR-4	55	L41.35_71.18	p10_20	v1.99_2-3_4-5_6-7_s0

	参数	示例	说明	单位
a	层数：内层连续层叠	04（1-4-1）	4 层多基板：2 个连续层叠的外层和 4 个内层	数值
b	层叠和最终电镀之后的总厚度	188	1880μm	每 10μm
c	材料类型	FR-4	材料质量	
d	层叠和最终电镀之后外层厚度	55	55μm	每 1μm
e	不同类型的内层材料和两面的铜箔	L41.35_L73.18	L = 芯体材料（前缀）：芯体厚度 410μm + 铜箔 2 × 35μm + 芯体厚度 730μm + 铜箔 2 × 18μm	每 10μm 每 1μm
f	预浸材料的数量和厚度	p10_p20	P = 预浸材料（前缀）：芯体厚度 410μm + 芯体厚度 730μm	每 10μm

（续）

a	b	c	d	e	f	g + h + i
04	188	FR-4	55	L41. 35_71. 18	p10_20	v1. 99_2-3_4-5_6-7_s0
	参数			示例	说明	单位
g +	埋孔			v2-3	V = 埋孔（前缀）：连接内层 2 到内层 3	内层
h +	盲孔			v1. v99	V = 盲孔（前缀）：连接外层 01 到内层 2/3/4 等以及外层 99 到内层 7/8 等	外层：顶部外层是 1 层，底部外层是 99 层
i	特殊的组装码			s0	无	

注：总厚度的容差 = ±5%。

11.6　几个常用标准

1）IPC-1710：用于印制电路板制造商资格鉴定的原始设备制造商标准。该标准用于评估印制电路板制造商的能力，使印制电路板制造商更容易满足消费者的需求。这个标准的目的在于减少日常文书工作和提高制造商的效率。

2）IPC-HM-860：多层混合电路规范。这个标准包括在混合封装中使用的多层电路的鉴定和性能要求。这些电路是由被绝缘材料彼此分离的三层或更多层导体图形组成的，并被连续的金属内层连接线连接。

3）IPC-ML-960：多层印制电路板用预制内层层压板的鉴定与性能规范。这个规范包括在多层印制电路板用内层层压板的鉴定与性能要求，还包括测试程序和标准。

4）IPC-TR-481：多层印制电路板联合试验计划结果。该报告用于多基板数据的收集和评估，以及多基板的材料和制造过程对其可靠性的影响。

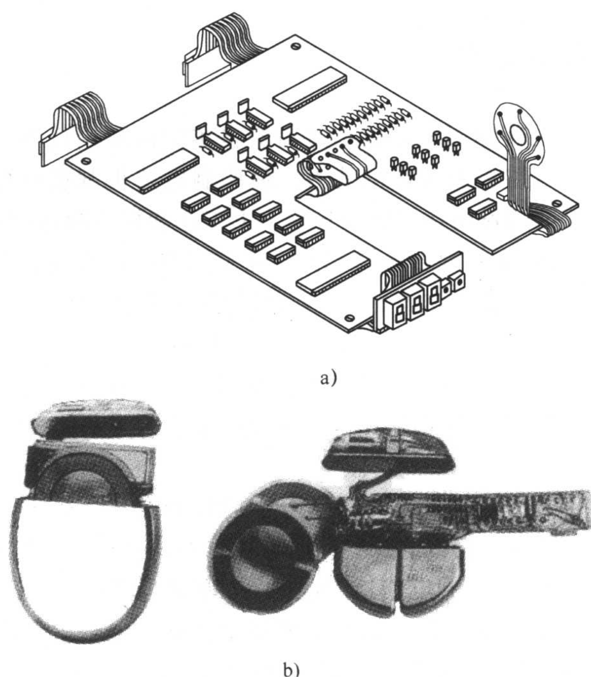
5）IPC-SKILL-201：印制电路板制造的 IPC 技术标准。这个标准详述了超过 40 个工业业界关于电路板制造方面的重要技术标准，包括关于印制电路板制造的操作条件、操作声明、性能标准、评估和可达到的可信度。

6）IPC-TMRC-01T：2001 年刚性印制电路板技术趋势。这个报告详细叙述了导体宽度和间距、孔的处理、电测试和光测试、金属磨光和焊锡膜使用的趋势，也包括多基板生产、表面贴装和密距技术的发展趋势。

第 12 章　柔性印制电路板

12.1　什么是柔性印制电路板

在一个三维的封装中，柔性印制电路板用于连接刚性板、显示器、连接器和其他各种元器件。它们能被折弯或变形，以互连多样的面板或适应特定的封装尺寸。柔性印制电路也能够连接移动的元器件，主要用于磁盘驱动器、打印机头和其他连续移动的电子设备。图 12-1 为典型的柔性印制电路。



a)

b)

图 12-1　柔性印制电路设计的典型实例和双层柔性印制电路在可移植心脏起搏器中的应用（经 Minco Products 允许，USA：Minco Application Aid 24，2000）
a）柔性印制电路设计的典型实例　b）在可移植心脏起搏器中使用的双层柔性印制电路

与传统的接线相比，柔性印制电路板构建了另一种可靠的方案。它们不但提高了连线的可靠性，而且还简单化了组装，并改善了元器件的外观。由于除

去了大量的电线，柔性印制电路提供了干净整齐的外观。通常，柔性印制电路只安装于一侧，因此，在安装和维护期间较少出错，从而减少了重做和排除故障的时间。由于柔性印制电路板比刚性印制电路板对撞击和振动具有更强的承受力，因而维修和替换成本也明显减少。柔性印制电路即薄又轻、耐用性好，而且能够适合更宽的温度范围和极端的环境，它们可以很好地进行细线电路和高密度电路的设计，并且比传统的印制电路板更合适于动态应用和振动环境。柔性印制电路密度高、重量轻，因而更是卫星和航空电子设备、高端传感器、柔性发热元器件、医学设备、遥控设备和安全设备中冗余电路的理想选择。

柔性印制电路板在可重复性、可靠性和高密度方面具有和刚性印制电路板一样的优点。然而，采用柔性印制电路技术最重要的原因是由于其具有三维结构的能力，在安装、维护和使用期间，这些电路可以弯曲。精心的设计可使柔性印制电路减少 75% 的空间和/或传统导线重量。

12.2 柔性印制电路板的构造

图 12-2 为柔性印制电路板的结构件。它们由在绝缘基板（薄膜）上用胶粘上铜箔形成的导线构成，使用覆盖层或特殊的图层保护铜箔使其不接触腐蚀性的物质。

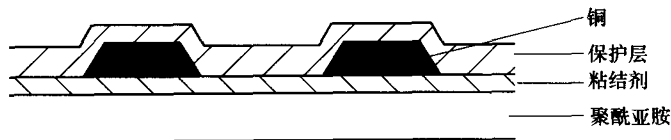


图 12-2 柔性印制电路板结构件的图解视图

12.2.1 薄膜的类型及性能

柔性印制电路板使用了柔性层压板。层压板的性能不但对其生产过程是重要的，而且对完成电路的性能也是重要的。柔性层压板由导电箔和绝缘基板组成，柔性印制电路中应用的绝缘基板有两种类型：

1）热固性塑料：有聚酰亚胺、聚丙烯酸钠等。

2）热塑性塑料：包括经过加工以后，遇热会软化的材料，例如一些聚酯薄膜类型、氟化氢、聚合体等。

当几乎所有的柔性印制电路都以聚酰亚胺或聚酯薄膜为基板时，铜层是最普遍应用的箔。需要特殊用途时，使用芳香族聚酸胺和碳氟化合物薄膜。

特殊的薄膜选择依靠许多因素，以下列举了这些特殊的薄膜：

1）高性能柔性印制电路，特别是在军事上的应用，采用聚酰亚胺薄膜制

造，因为它们提供了最好的全部工作性能。

2）在商业上，对电路的造价比较敏感，采用聚酯薄膜，这种薄膜以一个较低的成本提供了聚酰亚胺性能，且同时又减少了热阻。

3）芳香族聚酸胺非织纤维是很便宜的，并且有极好的机械和电子性能，但是有较强的吸湿性。

4）碳氟化合物薄膜，尽管价格昂贵并且处理困难，但是具有较高的绝缘性能，最适合应用于可控阻抗的电路中。

12.2.1.1 聚酰亚胺薄膜

在柔性印制电路中，最普遍使用的薄膜是聚酰亚胺薄膜，这是因为它有很好的电、热和化学性能。在焊接操作中，这种薄膜能承受焊接操作的温度。这种薄膜也被应用在导线绝缘以及变压器和发动机的绝缘中。

应用在柔性印制电路中的聚酰亚胺薄膜是 Kapton，这是美国杜邦公司的商标。Kapton/改良的丙烯酸薄膜的温度范围为 -65 ~ 150℃，但长期暴露在 150℃ 时电路将会变色。Kapton 类型的 H 薄膜是适用于工作温度范围为 -269 ~ 400℃ 的所有用途的薄膜。有一些专门类型的 Kapton 薄膜应用于有特殊性能的要求中，Kapton "XT" 是其中之一，它的热传导性是 Kapton 类型 H 薄膜散热能力的两倍，能使印制电路具有更高的热传递速度。聚酰亚胺薄膜可使用的标准厚度为 0.0005in、0.001in、0.002in、0.003in 和 0.005in（0.0125mm、0.025mm、0.050mm、0.075mm 和 0.125mm）。

聚酰亚胺薄膜大量应用的主要原因是它能够承受手工的和自动焊料焊接的热量。聚酰亚胺薄膜有极好的热阻，可在接近 300℃ 的温度下连续使用。在这些温度下，由于氧化和内部金属增生，铜箔和焊锡点会很快被破坏。层压板的性能由粘结剂和支撑薄膜的结合性能决定。因此，选择层压板时，了解粘结剂和薄膜性能的影响是很重要的。

聚酰亚胺薄膜具有阻燃性，当与特殊的复合耐火粘结剂粘接时，层压板产品能够承受高温。然而，许多柔性印制电路粘结剂有更低的阻抗，虽然它们能够承受焊接温度，但是在聚酰亚胺薄膜层压板中，这些粘结剂的连接性能较差。表 12-1 列出了聚酰亚胺薄膜的性能。

表 12-1 聚酰亚胺薄膜的性能（经 Stearns 同意，1992）

（在 25℃，1mil（25μm）厚度的典型值。）

性　　能	Upilex-S	Kapton-H	Apical
密度/（g/cm^3）	1.47	1.42	1.42
抗拉强度/psi	56 800	25 000	35 000
伸长率	30%	75%	95%
拉伸模数/psi	1 280 000	430 000	460 000

（续）

性　　能	Upilex-S	Kapton-H	Apical
可燃性	94VTM-0	94VTM-0	94VTM-0
吸湿性	1.2%	3.0%	3.0%
透氧性/［ml/（m^2·mil)］	0.8	380	~380
透湿性/（g/m^2）①	1.7	84	~84
绝缘强度/（V/mil）	6800	7000	7800
绝缘常数	3.5	3.5	3.4
耗散因素	0.0013	0.0025	0.0014
体积电阻率/MΩ·cm	1×10^{11}	1×10^{12}	3×10^{11}

① “透湿性”通常用“透湿量”衡量，即某一物质单位时间内单位面积上通过水蒸气的量，单位一般为“g/（m^2·24h）”。——译者注。

一些聚酰亚胺薄膜吸收了大量的湿气。先前暴露于温度升高中的层压板，例如在焊接温度下，必须被烘干。对于单层电路，应保持在100℃或更高的温度中至少1h，而对于多层结构电路，需要的时间则更长一些。因为重新摄取湿气是非常快的，如果处理不能在1h以内完成，则层压板应该被贮存在干燥的条件下。

1. 空间稳定性

柔性印制电路的一个重要性能是它们的空间稳定性。暴露在各种各样的加工环境中，柔性层压板固有的膨胀和收缩系数比以玻璃增强的刚性系统更大。柔性层压板的稳定性取决于薄膜的性能，构成层压板的粘结剂性能和加工条件使柔性层压板的稳定性退化（Stearns，1992）。精细的层压板制造使用了低网张力、抽真空层压和热稳定薄膜，可以将收缩减到最小。蚀刻以后，具有高抗拉强度的高性能薄膜可达到0.1%的收缩率，而用传统的聚酰亚胺薄膜制作的层压板的收缩率通常可以达到0.15%。如果没有其他错误的出现，这些收缩值可能看起来是微不足道的、可容忍的、可预计的，但是许多时候，它们是不符合要求的，需要花很高的成本去抑制它。

2. 抗拉强度

柔性印制电路通常是有多个应力集中点的复杂几何学，这就使抗拉强度成为了其重要的性能。例如，一个被撕裂的电路不能被修复。因为多数的柔性粘结剂比聚酰亚胺薄膜具有更好的抗拉强度，所以粘结剂能提高层压板性能。

薄膜的性能是具有好的空间稳定性的根本，它可以降低撕裂度，因为柔软的薄膜在被扯坏之前具有较大的伸长量。

在柔性层压板中，粘结剂是主要的绝缘物质，它本身具有绝缘阻抗和一定的绝缘强度。因而，当在印制电路板布局中设计导线分布图时，柔性印制电路设计者一定要仔细了解层压板的性能，而不是薄膜的性能。

由于聚酰亚胺薄膜和粘结剂具有高的介电常数（3.7 或更大）和耗散因数（大于 0.03），因此它们在可控阻抗的应用中有相对较差的电性能。受该局限性的限制，在这样的应用中应采用一些其他类型的层压板。

12.2.1.2 聚酯薄膜

绝缘基板薄膜——聚酯薄膜的力学性能类似于聚酰亚胺薄膜，且它的导电能力很强，吸湿性极小。然而，多数的聚酯薄膜可以在不低于 125℃下使用，但它们在耐热性方面的一些至关重要的参数（如最高温度）上比不上聚酰亚胺薄膜。它们的熔点也低于焊接温度。虽然如此，通过使用专门的技术，像压接或加压的方法，聚酯薄膜能减少柔性印制电路的成本，且不降低电路的性能和质量。在汽车和通信电路中，聚酯薄膜是应用最普遍的。

与聚酰亚胺薄膜相比，聚酯薄膜有很低的介电常数，更高的绝缘阻抗，更大的抗拉强度和较低的价格。聚酯薄膜的吸湿性是良好的，在极好的空间稳定性下，其值小于 1%。聚酯薄膜仅在热敏电阻区域内有局限性，但是它具有很大的价格优势。聚酯对溶剂和其他化学药品有高的抗腐蚀能力，它还有高抗拉强度（25000psi）和高绝缘强度（每 0.001in 厚薄膜的绝缘强度为 $7.5kV \times 10^{-3}in$）[㊀]。

聚酯薄膜是一种聚合体。最常用的聚酯薄膜之一是“Mylar”[㊁]，Mylar 是商品名，是由美国 M/s 杜邦公司生产的产品。聚酯薄膜使用的温度范围为 75～150℃，这使它不适合超过 230℃的焊接温度。这个问题可通过使用大的焊盘、宽导线和 0.00275in（0.07mm）厚度的铜箔来解决，并利用适当的罩具或夹具使热量远离除被焊接电路以外的所有的元器件。

12.2.1.3 芳香族聚酸胺薄膜

通常被用于电动机和发电机绝缘的非织芳香族聚酸胺纤维价格便宜，并且有突出的绝缘强度和热性能。它们可在 220℃的温度下连续使用，当与合适的层压粘结剂配合使用时，可制成很好的柔性层压板。

这种产品有很好的张力和抗拉强度，也有较高的空间稳定性，然而它非常容易吸湿。与使用聚酰亚胺的层压板一样，在焊接组装之前，使用芳香族聚酸胺的层压板也必须进行彻底的干燥，并且在整个组装过程中保持干燥。

㊀ 本书原文此处有误，因“绝缘强度”是指单位厚度绝缘材料的击穿电压，故“$7.5kV \times 10^{-3}in$”应该为“$7.5kV/10^{-3}in$”，即 7.5kV/mil。其中，$1mil = 10^{-3}in$。——译者注

㊁ 中译名为“迈拉”，一种聚酯类高分子物的商品名。——译者注

芳香族聚酸胺薄膜的缺点表现在其污染性上。当层压板暴露于液体中进行加工处理时，化学物质可能浸入到纤维结构中，留下永久的污点，这会引起潜在的绝缘阻抗问题。芳香族聚酸胺薄膜有许多优良的性能，并且价格便宜，但是它们的缺点使它们很难在大量柔性印制电路中得到应用。

常用的芳香族聚酸胺材料之一是“Nomex”[⊖]，Nomex 是 M/s 杜邦公司的一个商标。Nomex 是一种能够极好的可承受焊接温度的高温纸，它很难撕裂且延伸极慢。

12.2.1.4　碳氟化合物薄膜

在 Kapton 出现以前，最初的柔性印制电路使用高性能的碳氟化合物薄膜。不可比拟的化学惰性、极高的热阻、突出的绝缘性能和坚硬的力学性能使碳氟化合物薄膜成为柔性印制电路的理想选择。

用熔解合成法制成的碳氟化合物电介质空间稳定性差。层压板在其要求的温度（接近 300℃）下对半熔解的电介质所造成的应力可以破坏纤细和精密的印制导线。

对于柔性印制电路，碳氟化合物薄膜具有极好的性能，特别是它们的抗扯值非常好。鉴于这个性能，碳氟化合物碎片有时被用于加强聚酰亚胺电路的不耐用的区域。碳氟化合物层压板本身对于一般的化学物质呈惰性，且它固有不燃性，所以在生产过程和使用中不会引起任何问题。

由于碳氟化合物薄膜极好的抗化学性，所以在镀通孔过程中，不容易被镀铜。使用水浴槽的方法对于增强孔壁上的无电镀铜的附着几乎没有任何作用，需要使用额外的处理步骤。

现在，电路和层压板的制造已变得较容易，碳氟化合物薄膜的组装可以用粘结剂代替熔接过程，虽然空间稳定性没有达到聚酰亚胺的水平，但是已有很大的提高。如果粘结剂保持尽可能的薄，电路将以较低的成本实现熔接电路的极好的电性能。

12.2.1.5　电介质的选择

柔性层压板绝缘基板对制造的成本和成品电路的性能有重要的影响。聚酰亚胺薄膜对此提供了最好的性价比。

聚酯薄膜居其次，只是在热阻方面稍逊一筹。芳香族聚酸胺非织纤维有独特的性能，建议使用于成本有限而性能要求不是很高的场合中。碳氟化合物有极好的绝缘性能，适合于要求可控阻抗的应用中。

表 12-2 给出了聚酯薄膜、碳氟化合物薄膜和芳香族聚酸胺薄膜的性能。

⊖ 中译名为“诺梅克斯”，一种轻质耐高温芳香族聚酰胺的商品名，可用于制造宇航服或消防服。——译者注

表 12-2　聚酯薄膜、碳氟化合物薄膜和芳香族聚酸胺薄膜的性能

性能	聚酯	碳氟化合物	芳香族聚酸胺
抗拉强度/kpsi	20～40	2.5～3	6～10①
伸长率	60%～165%	300%	9%
抗拉强度/g/mil	50～130	125	550
传导	50～300	125	45～80②
吸湿性	0.25%	<0.01%	3%～7%
透湿性/（$g\cdot mil/100in^2/24h$）③	1～1.3	0.4	N/A
绝缘强度/（V/mil）	7500	6500	530
绝缘常数（1kHz～1GHz）	3.2～2.8	2.0～2.05	2.3
耗散因素（1Hz～1GHz）	0.003～0.016	0.0003～0.0015	0.007
抗化学性	好	极好	好

① 每 mil 以 2mil 厚度为基础。

② 每 mil 以 2mil 的 Elmdorf 测试为基础。

③ 本书此处原文有误，“透湿性”通常用“透湿量”衡量，即某一物质单位时间内单位面积上通过水蒸气的量，单位一般为“$g/(m^2\cdot 24h)$”，故“$g\cdot mil/100in^2/24h$”应改为“$g/(100in^2\cdot 24h)$”。——译者注

12.2.2　铜箔

在柔性印制电路中，铜箔作为基材使用，这是众所周知的。然而，却有很少人知道它是怎样制造的。为柔性印制电路工业提供的优质铜箔产品的生产需要许多加工步骤。

目前，柔性层压板使用的铜箔类型有两种：①压延退火铜箔（也被称作为锻碾铜箔）；② 电解铜箔。铜箔的制造方法，不是压延退火就是电解，这些方法确定了它们的力学性能。根据铜箔的力学性能和应用，每一种铜箔又进一步被分成不同的等级。表 12-3 中给出了铜箔的分类，电解铜箔和锻碾铜箔分别被分为四个等级（Savage，1992）。通常电解铜箔为 1～4 级，用于刚性印制电路板中。柔性印制电路使用所有的电解铜箔和锻碾铜箔的 5～8 级。典型的 2、5、7 和 8 级被应用在柔性层压板中。

表 12-3　铜箔的分类（经 Savage 同意，1992）

类型	IPC 等级	种类	应用
电解	1	标准	刚性层压板
电解	2	高延展性	汽车的柔性印制电路
电解	3	高温，延长	多基板内层
电解	4	超高的延展性	
锻碾	5	作为压延	复杂的柔性印制电路
锻碾	6	特殊温度	
锻碾	7	压延退火	军用柔性印制电路
锻碾	8	低温，退火	商用柔性印制电路

12.2.2.1　压延退火铜箔

压延退火铜箔的制造，首先要加热铜锭，然后把它们送入一系列的滚筒中，使它们缩减为指定厚度的铜箔，如图 12-3 所示。旋转生成了铜箔中的颗粒结构，这些颗粒结构看起来像搭接的水平面上。在压力和温度的作用下，大小不同的铜颗粒之间相互作用，这就行成了铜箔的性能，例如延展性和硬度，同时也产生了一个光滑的表面。与电解铜箔相比，这种生产工艺生产的铜箔能承受更大的反复弯曲。然而，它的缺点是成本较高，铜箔的厚度和宽度的可选性较少。

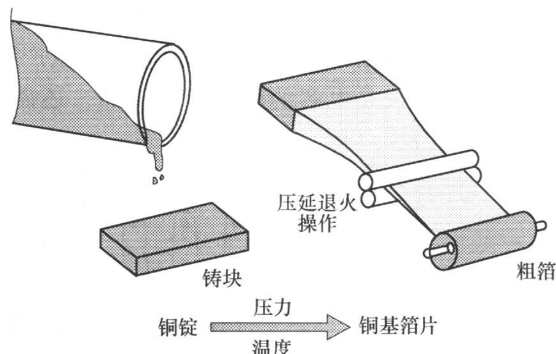


图 12-3　压延退火方法制造的铜箔产品

12.2.2.2　电解铜箔

电解铜箔的制造是将铜离子电镀到一个圆柱形阴极上，铜箔不断地从上面剥离下来。电解铜箔是柱状晶粒结构的，当铜箔被弯曲时颗粒分离，这就使得铜箔弯曲时，其柔性和抗破裂能力比压延退火铜箔要小。图 12-4 为电解铜箔制造过程的示意图。

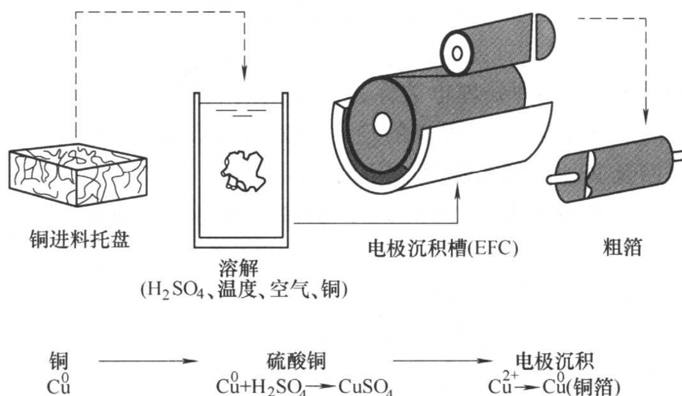


图 12-4　电解铜箔制造过程示意图（Savage，1992）

电解过程开始是将铜从硫酸溶液中分解出来，通过温度和搅动来控制分解率。铜箔的外形和力学性能可能过使用不同类型的添加剂加以控制。

铜溶液不断地被注入电解池中，在电解池阳极和阴极之间电流的作用下，铜离子从化学池中析出到阴极表面。阴极是一个旋转的圆柱形磁鼓，它的一部

分浸没在溶液中。当阴极进入溶液中时，铜开始沉积在磁鼓的表面，并且连续电镀直到磁鼓离开溶液。当阴极继续旋转时，铜箔从阴极剥离。阴极磁鼓的旋转速度决定了铜箔的厚度，电解过程能够生产许多厚度和宽度的铜箔。

不论锻碾或是电解的原始铜箔产品，还需要分三个处理阶段进行加工，如图 12-5 所示。

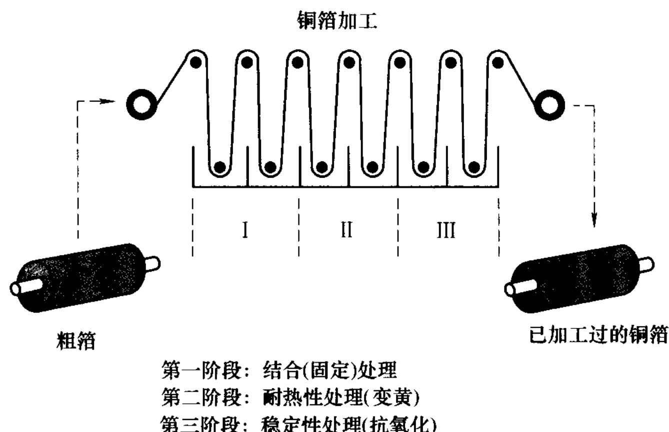


图 12-5 铜箔的处理阶段和稳定性（经 Savage 同意，1992）

1）结合（固定）处理：这种处理通常包括金属铜/铜氧化物的处理，增加了铜的表面积，为粘结剂或树脂提供了更好的湿润性。

2）耐热性处理：这种处理使得覆铜层压板能够承受印制电路板制造过程中的高温环境。

3）稳定性处理：这种处理也被称为钝化或抗氧化，这个处理被应用在铜的两面，用来预防氧化和着色。所有的稳定性处理是以铬合金为基础的，一些制造者将镍、锌以及其他金属与铬结合使用。

处理之后，铜卷被切成需要的宽度，切口芯部用塑料薄膜包装以防止氧化。铜箔的延展性如下：

1）电解铜箔：延长 4% ~40%。

2）压延退火铜箔：延长 20% ~45%。

铜箔通常使用由聚酰亚胺或液态的聚合体溶液制成的薄膜覆盖。经过这种处理，导体薄膜可使铜箔受到长期的保护，免受腐蚀性环境和焊料污染的影响。

12.2.3 粘结剂

在柔性印制电路中粘结剂的作用是把铜箔和绝缘基板粘接在一起，而在多层柔性的设计中，则把内层粘接在一起。所用的粘结剂和支撑介电薄膜的性能共同决定了柔性层压板的性能。焊接之后柔性印制电路的结合强度、空间稳定

性和柔韧性是决定粘结剂是否与其应用场合相适宜的关键因素（Wallig，1992）。

粘结剂，例如丙烯酸树脂、聚酰亚胺树脂、环氧树脂、改良的聚酯和缩丁醛酚醛树脂已经不同程度地成功粘接了柔性印制电路。因为聚酰亚胺和聚酯绝缘薄膜是两种最常用的基板材料，下面来说明这些粘结剂的典型应用。

12.2.3.1　丙烯酸粘结剂

丙烯酸粘结剂具有高热阻和良好的电性能。它们已经被成功的应用在聚酰亚胺薄膜基板上，并已经使聚酰亚胺/丙烯酸成为动态柔性应用的首要选择。然而，许多柔性印制电路制造商发现丙烯酸粘结剂的厚度和较高的 z 轴扩张，成为了在电子封装方面有更多要求的限制因素。另外，一些在光阻过程中使用的溶剂和在电镀和蚀刻中使用的碱性溶剂容易对聚酰亚胺/丙烯酸粘结剂层压板造成影响。如果这些溶剂没有被去除，被多层层压板吸收的溶剂是很难剔除掉的，这会导致层的分离或起泡问题。

在高密度设计中，空间稳定性和小钻孔的问题（钻孔涂污）可能造成产量的减少，换言之，就是增加了单位成本。如果这些问题不被控制，则可能导致镀通孔故障。

大部分刚柔性系统使用丙烯酸粘结剂制造。基于此，大多数回蚀或孔清洗过程普遍使用的是等离子体系统。等离子体系统使用被电离的气体工作，它是由一个射频源将混合了氧气的氟利昂电离产生的。它可以去除装配的柔性印制电路部分的涂污，但是并不损坏可能存在于刚性部分孔中的玻璃纤维。等离子体处理之后，留在孔中的有机残余物可使用碱性清洗剂通过超声波清洁器清除，这个过程需要在 140℃ 温度下持续 2～3min。

12.2.3.2　聚酰亚胺树脂和环氧树脂

聚酰亚胺物质也可以与聚酰亚胺粘结剂成功配对使用。聚酰亚胺粘结剂的抗化学性能及电性能和丙烯酸粘结剂一样好，甚至比丙烯酸粘结剂更好。另外，它们比柔性印制电路中使用的其他任何粘结剂都具有更好的热阻。

一些以聚酰亚胺为基础的柔性印制电路层压板混合了环氧树脂作为粘结剂。环氧树脂通常具有良好的电性能、热性能和力学性能，然而由于在加工过程中出现的树脂交叉连接，使它们只局限于静态挠曲的应用。

聚酰亚胺和环氧粘结剂较小的动态柔性不是一个严格的限制，因为生产的大多数柔性印制电路应用于静态柔性中。聚酰亚胺和环氧粘结剂增加了层压板的硬度，这使得多层柔性和刚性板具有更好的空间稳定性，更好的加工性和较小的整体粘接厚度。

在焊锡过程中，环氧树脂保持了良好的环境。在周围环境温度达到 120℃ 时，它们显示出了长期的稳定性。环氧树脂系统包括改良的丁缩酚醛和腈酚醛树脂。它们被广泛的应用，价格通常比丙烯酸树脂低，但是比聚酯薄膜高。

12.2.3.3 聚酯薄膜和酚醛塑料

通常用于聚酯基板的典型粘结剂有，聚酯薄膜或丁缩醛酚醛塑料粘结剂。聚酯薄膜粘结剂具有极好的电性能、极好的柔性和较低的热阻。聚酯薄膜是一种最低价格的粘结剂，聚酯薄膜粘结剂是惟一能够适于粘接层压板和聚酯覆膜的粘结剂。聚酯薄膜粘结剂较低的热阻不能应用于层压，可用于不需要进行锡钎焊的电路中，如许多自动推进电路以及成本有限的消费类电子产品的电路中。

与聚酯粘结剂相比，丁缩醛酚粘结剂的热阻较大，但是它们的电性能不是很好，并且柔性也不是很好。然而，通过添加剂的应用，能够增强酚醛塑料粘结剂的柔性。

12.2.3.4 无胶层压板

在新材料中，一个主要的创新是无胶覆铜层压板，它的出现迅速引起了柔性印制电路制造者和使用者的注意，因为它为单面和双面电路提供了改良的操作性能，也为软硬结合板提供了改良的操作性能（Pollack 和 Jacques，1992）。

在一些新型层压板中，不需使用粘结剂铜就被粘接到聚酰亚胺薄膜上了。与使用粘结剂的层压板相比，无胶层压板具有更薄的电路、更大的柔性和更好的导热性（Cram，1994a）。另外，更多层数的软硬结合板的热应力性能也极好。使用以下四种技术中的任何一种都能够制造出无胶层压板，这四种技术包括：① 浇铸薄膜；② 蒸气沉积薄膜；③ 飞溅薄膜；④ 电镀薄膜。

浇铸薄膜方法包括在金属箔表面浇铸聚乙烯氨基酸溶液，然后将其全部加热到一定温度，使溶剂蒸发、聚乙烯氨基酸亚胺化，这个过程形成了聚酰亚胺或经改良的氨基聚酰亚胺薄膜。尽管铜能够很好地附着在薄膜上，但是这个方法通常限制铜的厚度在 1oz 以上。虽然可形成较薄的铜，但处理很困难，并且成本也太高。通过观察，无胶层压板比使用粘结剂层压板尺寸变化的可重复性更小。

对于蒸气沉积方法，铜在真空舱中蒸发，金属蒸气沉积在薄膜上。通过对薄膜的表面处理可提高铜的附着力。这种方法通常限制铜的厚度大约为 0.2μm，其他的铜的厚度可通过电解电镀保证。

飞溅薄膜的方法包括把薄膜放置在一个有铜阴极的大真空舱内。这个阴极被正离子轰击，产生了带电的铜粒子，粘附在薄膜上，形成了极薄的铜箔，随后通过电解铜的层叠达到想要的厚度。然而，这种铜的附着力没有浇铸或电镀的方法好，而空间稳定性与使用粘结剂的材料相当。

使用电镀薄膜的方法制造无胶层压板，就是在聚酰亚胺薄膜上镀铜。这个过程首先要对薄膜卷进行表面处理，接着使用极薄的金属阻隔涂层来提高铜的附着力，然后铜被不断的电镀在金属阻隔涂层上，以达到理想的厚度。这种金

属沉积的过程可以控制，以形成很薄的铜箔，具有较大的需求量。

一种常见的无胶聚酰亚胺层压板是 M/s 杜邦公司生产的 Pyralux AP（杜邦公司的电子材料，美国北卡罗来纳州研究三角公园）。这种层压板在 200℃ 以上的温度中能够保持连续的热稳定性、极好的抗化学性、低的吸湿性、在 z 轴方向上的低热膨胀系数，以及极好的焊接阻抗。它们和丙烯酸的、环氧的和聚酰亚胺的粘结剂是兼容的（Crum，1994）。Pyralux AP 是一种双面铜箔的层压板，它是由聚酰亚胺薄膜粘接在铜箔上的无胶合成物。层压板的所有聚酰亚胺绝缘体结构改善了柔性印制电路，并被推荐应用于双面、多层柔性板，也应用于需要先进的材料性能和高可靠性的软硬结合板中。层压板由 IPC-FC-241/11 Class 3 鉴定。

12.2.3.5 无胶层压板的优点

当无胶层压板用于制造柔性印制电路和刚柔性多基板时，能发挥其极好的性能优势。许多优点是基于其本身电路较薄，并且避免了薄膜与铜箔粘接时粘结剂不匹配的问题的。无胶覆铜层压板较薄是因为通常层压板中缺少了 1 ~ 2mil 的粘结剂，这个优点使电路层数成比例的增加。已经发现，在镀通孔时使用无胶层压板能减少 4mil 的厚度，可与双面板相媲美。

目前，丙烯酸粘结剂在粘接柔性印制电路中的应用已经被认为是限制使用的材料技术，这是由于在粘结剂和聚酰亚胺薄膜之间的高热扩张系数与铜的延展性相互矛盾，这个问题通过对电路结构的不同处理已经得到解决。所有这些方法的共同目的就是通过在重要区域（例如刚柔电路部分）有选择地减少粘结剂基材的使用来尽可能地避免粘结剂带来的问题，特别是覆膜和用改良的丙烯酸树脂制造的浇铸粘结剂。

对于粘结剂基板不适合的操作环境，可使用无胶电路，它的薄结构具有很好的导热性，并且避免了粘结剂的热阻问题。聚酰亚胺可在 450℃ 的温度下连续工作，且不会使材料退化。粘接到散热器上的无胶电路可应用于高性能和高可靠性的电路中，例如自动推进电子电路。

无胶电路的另外一个重要的性能是它能够保持相同的厚度。由于薄膜的玻璃转换温度高，铜走线不会变形为基板薄膜。相反，使用粘结剂的导体图形则不可控制。

目前，已经对无胶电路与使用粘结剂的电路的性能进行了宽范围的测试比较。图 12-6 为使用标准的粘结剂制造的 10 层板和由电镀的方法制造的相同层数的电路的弯曲循环数的比较结果。由图可知，无胶电路中导体被破坏的弯曲循环数相当高，无胶电路可承受的弯曲周期数为使用标准粘结剂电路的两倍。

图 12-7 为电镀膜材料和使用标准粘结剂的 18 层电路中镀通孔的完整性比较。在 -65 ~ 125℃之间，标准的粘结剂电路只持续了 175 个温度周期，而无胶

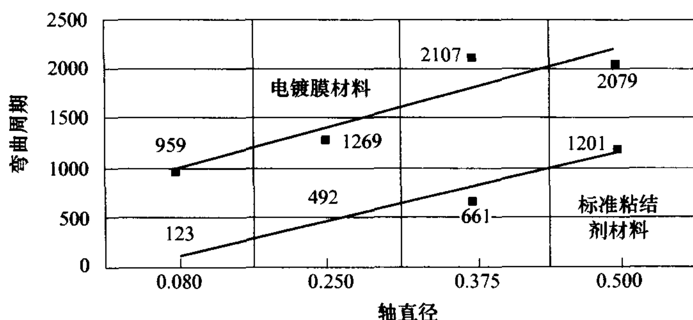


图 12-6 连续弯曲周期数比较（经 Crum 同意，1994a）

电路在 500 个温度周期时仍然保持完好。

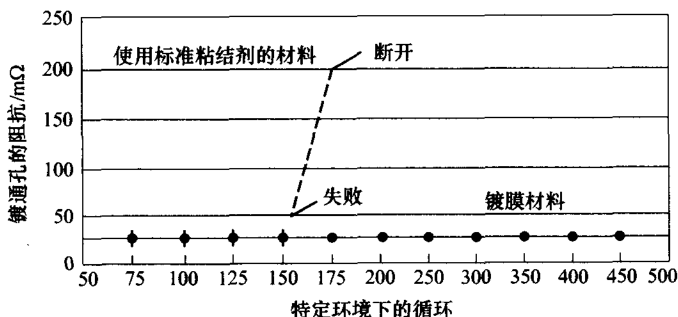


图 12-7 特定环境下的循环结果

12.3 柔性印制电路板设计的考虑因素

12.3.1 刚性印制电路板和柔性印制电路板设计考虑因素的区别

刚性印制电路板的大部分设计要素已经被应用在柔性印制电路板的设计中了。然而，还有另外一些新的要素需要引起注意。

1. 导线的载流能力

因为柔性印制电路板散热能力差（与刚性印制电路板相比而言），所以必须提供足够的导线宽度。图 12-8 中给出了电流在 1A 以上时，选择导线宽度的原则。一些承载大电流的导线彼此面对面或邻近放置时，考虑到热量集中的问题，必须给出额外的导线宽度或间距。

2. 形状

无论何处，在有可能的情况下应首选矩形，因为这样可以较好的节省基材。在接近边缘处应该留有足够的自由边距，这要根据基材可能的剩余空间而定。

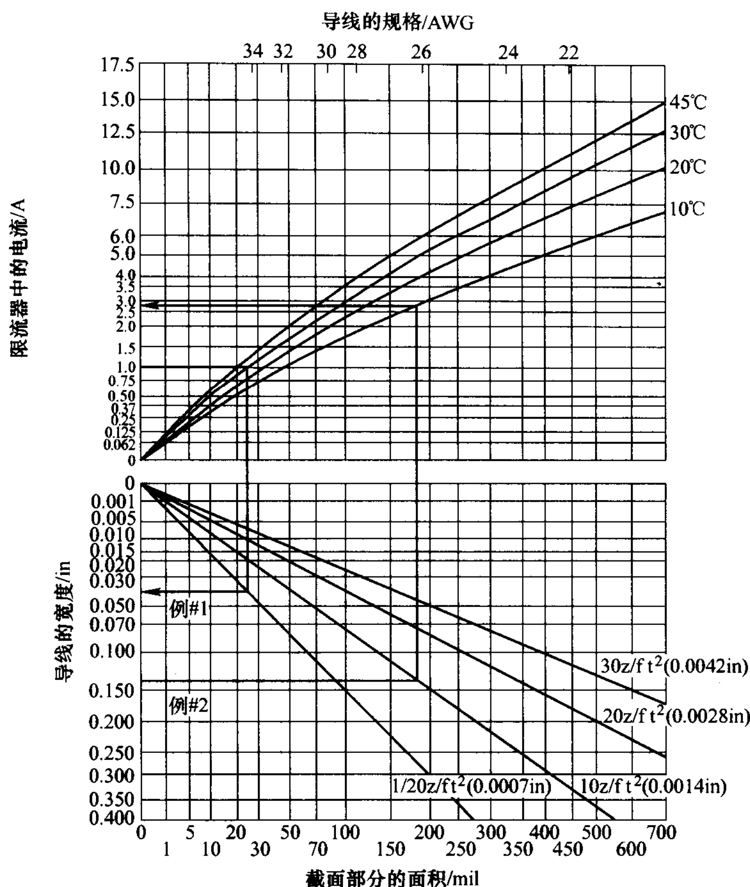


图 12-8　选择导线宽度的原则（www. minco. com）

注：例　1：1oz 铜箔中流过的电流为 1A，温度上升 30℃时，需要的导线宽度为 0. 040in。

例　2：1oz 铜箔（0. 0014in），蚀刻的导线宽度为 0. 140in，

当流过的电流为 2. 7A 时，可引起的上升温度为 10℃。

在形状上，内角看起来应该是圆形的；尖形的内角可能引起板的撕裂。

较小的导线宽度和间距应该尽可能最小化。如果几何空间允许，排列紧密的细导线应该变为宽导线。在镀通孔或元器件安装孔处终止的导线应该平滑地过渡到焊盘中，如图 12-9 所示。作为一个通用标准，任何从直线到象角或不同线宽的变化，必须尽可能的平滑过渡。尖角会使应力自然集中，引起导线故障。

3. 柔度

作为一个通用标准，弯曲半径应该设计得尽可能大。使用较薄的层压板（例如：用 50μm 铜箔代替 125μm 铜箔）和较宽的导线，可以更好地提高其承受更多循环弯曲的可能性。对于大量的弯曲循环，单面柔性印制电路板通常显示

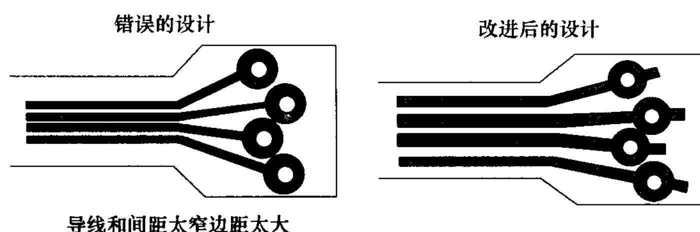


图 12-9 导线平滑地过渡到焊盘可减小应力提高可靠性

了更好的性能。

4. 焊盘

在焊盘的周围，有一个从柔性材料到刚性材料的变化。这个区域更容易使导体破损。因此，焊盘应避免出现在容易产生弯曲的区域。

焊盘的一般形状应该是像泪滴状（见图 12-10），覆膜必须能遮住焊盘的接合缝。

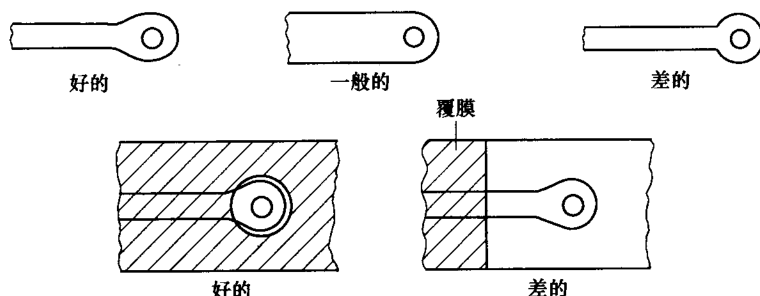


图 12-10 焊盘的形状和焊盘结合处的覆膜（经 Bosshart 同意，1983）

5. 刚性增强板

在小型电子设备（如小型计算器）的批量生产中，结合有胶着刚性层压增强板的柔性印制电路板已经变得很受欢迎了，而且其在成本上也更为优化。柔性印制电路板被装备在一片有合适槽位的刚性板（例如 grade G-10）上，以方便以后分离，如图 12-11 所示。元器件组装和波峰焊接之后，通过裁切把刚性板分成不同的部分，以便于折叠成想要的形状。

上述特别的要求表明设计柔性板仅有少数的几步，远比设计刚性板少。然而，其重要的设计差别必须记住：

1）柔性印制电路的三维空间很重要，因为弯曲和柔性的应用可以节省空间并减少板层。

2）与刚性板相比，柔性板对公差的要求较低，允许更大的公差范围。

3）因为两翼可以弯曲，它们被设计的比要求的稍微长一些。

为了使电路成本达到最小，以下的设计技巧应当被考虑：

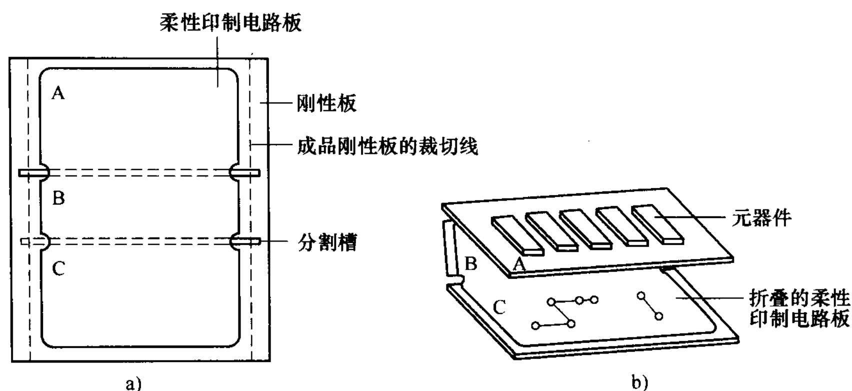


图 12-11　刚性增强板的使用

a）元器件组装和波峰焊接　b）刚性板裁切和折叠之后的成品板

1）总是要考虑电路怎样被装配在面板上。

2）电路要小巧，应考虑使用一系列小电路代替一个大电路。

3）无论何时都要遵循建议的使用公差。

4）仅在必需的地方设计无粘接的区域。

5）如果电路仅有少数几层，则使用增强板可比刚柔性印制电路便宜得多。

6）在每 oz 的覆铜材料（包括电镀铜）上，指定使用 0.0001in 的粘结剂。

7）制造无遮蔽焊盘且没有覆盖层的电路，有时会更便宜些。

12.3.2　柔性印制电路的分步设计

设计一个高质量、可制造的柔性印制电路的原则如下（Minco Application Aid 24）：

1）首先，最好是有目的地针对应用研究一些有价值的文献。最有用的文献是 IPC 标准或 MIL 标准，例如，如果电路准备应用于军事/航空航天领域，可以参考 IPC-6013 和 IPC-2223 或 MIL-P-50884。

2）根据电路中所用的封装形式来确定电路参数，这对于裁切出一个实际电路的纸模板很有帮助。通过弯曲和成型模板的实验，可以达到最高效率。设计最大的电路网络，可以使一个面板包含尽可能多的电路。

3）确定配线位置和导线的路径，这将决定导体层的数量。电路成本通常随层数的增加而增加。例如，两个两层电路可能比一个四层电路更便宜。

4）根据电流承载能力和电压计算导线宽度和间距。

5）确定使用何种材料。

6）选择导线终止的方法和通孔的尺寸。评估弯曲面积和导线终止的方法，以确定是否需要增强板。

7）放弃测试方法。避免使用超出规格的元器件，以降低成本。

12.3.3 柔性和可靠性设计

柔性印制电路可根据在组装和使用期间所遇到的弯曲类型进行分类（Corrigan，1992）。有两种设计类型，现讨论如下：

1）静态设计：静态设计是指产品只在装配过程中遇到的弯曲或折叠，或是在使用期间极少出现的弯曲或折叠。单面、双面和多层电路一样，都可以成功实现折叠的静态设计。通常，对于大部分双面和多基板的设计，折叠的弯曲半径最小应该是整个电路厚度的十倍。更多层数的电路（八层或更多）会变得非常坚硬，很难对它们进行折弯，所以不会出现任何问题。因此，对于需要严格弯曲半径的双面电路，在折叠区域要将所有的铜走线设置在基板薄膜的同一面上。通过移除相对面上的覆膜，使折叠的区域近似于一个单面电路。

2）动态设计：动态电路的设计针对产品的整个生命周期中反复进行的弯曲，例如，印制机和磁盘驱动器的电缆。为了使动态电路达到最长的弯曲生命周期，相关的部分应该设计为一个单面电路，且铜在中心轴上。中心轴是指一个理论上的平面，它在构成电路的材料的中心层。通过在铜的两面使用相同厚度的基板薄膜和覆膜，铜箔将准确的放在中心位置，并在折弯或弯曲期间所受压力最小。

需要高动态弯曲周期和高密度的多层复杂性设计现在可通过使用各项异性的（z 轴）粘结剂将双面或多层电路连接到单面电路中实现。弯曲仅发生在单面组装的地方，动态弯曲区域以外属于多层独立区域，这里不受弯曲的危及，可以安装复杂的配线和需要的元器件。

尽管期望柔性印制电路能满足所有需要折弯、弯曲和一些特殊电路的应用，但是在这些应用中，很大一部分弯曲或折弯都是失败的。在印制电路的制造中使用柔性材料，但是柔性材料本身并不能保证被弯曲或被折弯时电路功能的可靠性，特别是在动态应用中。许多因素可以提高印制柔性印制电路的成型或重复弯曲的可靠性。为确保成品电路的可靠运行，所有的这些因素在设计过程中都必须被考虑到。以下是增加柔性的一些技巧：

1）为了提高动态柔性，具有两层或更多层的电路应该选择电镀板。

2）建议保持最小的弯曲数。

3）导线要交错排列，以避免I型微聚束效应，导线路径要正交，以便于弯曲，如图12-12所示。

4）在弯曲区域，不要放置焊盘或通孔。

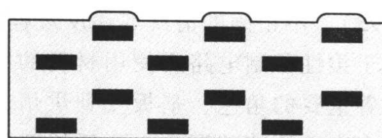
5）在任何弯曲区域附近不要放置陶瓷器件，从而避免涂覆层不连续、电镀层不连续或其他应力集中出现。应该保证在完成的组装中没有扭曲。扭曲可能

造成电路外边缘不应有的应力。消隐过程中出现的任何毛刺或不规则可能导致电路板破裂。

6）工厂成形加工应为首选。

7）在弯曲区域中，导体厚度和宽度应保持不变。在电镀或其他的涂覆层中应该有变化，以避免导线成颈状收缩。

8）在柔性印制电路中制作一个狭长的切口，允许不同的木质支架向不同的方向弯曲。尽管这是最大化功效的有效手段，但是切口处容易造成撕裂以及裂口的延伸，这个问题可通过在切口的末端制作一个钻孔来预防（见图 12-13），用刚性板或一片厚的柔性材料或聚四氟乙烯来加固这些区域（Finstad，2001）。另一种方法是使切口尽可能地宽，并在切口的末端制造一个完整的半圆（见图 12-14）。如果无法加固，在距离切口末端 1/2in 的地方，电路不能被弯曲。



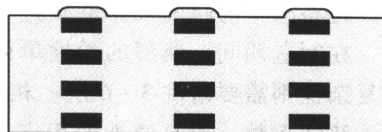


图 12-12 交错排列的导线与 I 型微聚束效应

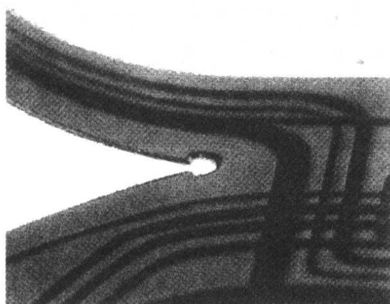


图 12-13 在切口的末端放置一个钻孔来预防电路撕裂

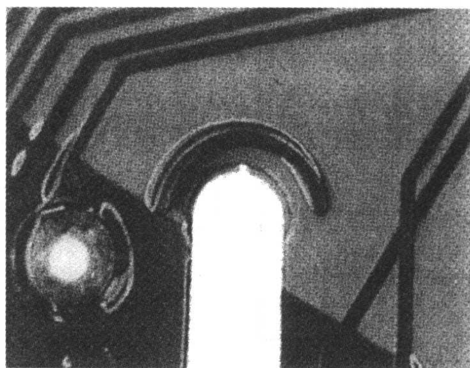


图 12-14 切口应尽可能地宽并在切口末端制造一个完整的半圆

12.4 柔性印制电路的制造

柔性印制电路板的生产过程基本上类似于刚性板的生产过程。对于某些操作，层压板的柔性需要有不同的装置和完全不同的处理方法。大多数柔性印制电路板采用负性的方法。然而，在柔性层压板的机械加工和同轴的处理过程中产生了一些困难，一个主要的问题就是基材的处理。柔性材料是不同宽度的卷材，因此在蚀刻期间，柔性层压板的传送需要使用刚性托架。

在生产过程中，柔性印制电路的处理和清洗比处理刚性板更重要（Lexin，

1993)。不正确的清洗或违反规程的操作可能导致之后产品制造中的失败，这是由于柔性印制电路所使用材料的敏感性决定的，在制造过程中柔性印制电路扮演着重要的角色。基板受到烘焙、层压和电镀等机械压力的影响，铜箔也易受敲击声、凹痕的影响，而延长部分确保了最大的柔韧性。铜箔的机械损伤或加工硬化将减少电路的柔韧寿命。

在制造期间，典型的柔性单面电路最少要清洗三次，然而，多基板由于它的复杂性则需要清洗 3～6 次。相比而言，刚性多层印制电路板可能需要同样数量的清洗次数，但是清洗的程序不同，清洗柔性材料时需要更加小心。即使是受到清洗过程中极轻的压力，柔性材料的空间稳定性也会受到影响，并且会在 x 或 y 方向导致面板拉长，这取决于压力的偏向。柔性印制电路板的化学清洗要注意环保。清洗过程包括碱性染浴、彻底的漂洗、微蚀刻和最后的清洗。薄膜材料的受损经常发生在面板上架过程中，在池中搅动时、从池中移除架子或没有搭架子时，以及在清池中表面张力的破坏。

柔性板中的孔一般采用冲孔，这导致了加工成本的增高。钻孔也是可以的，但这需要专门调整钻孔参数，从而获得无涂污的孔壁。钻孔之后，在有超声搅拌的水清洁器中去除钻孔污物。

已经证明，柔性板的大规模生产比刚性印制电路板更便宜。这是因为柔性层压板使制造商能够在一个连续的基础上生产电路，这个过程从层压板卷材开始，直接可生成成品板。图 12-15 为制造印制电路板并蚀刻柔性印制电路板的一

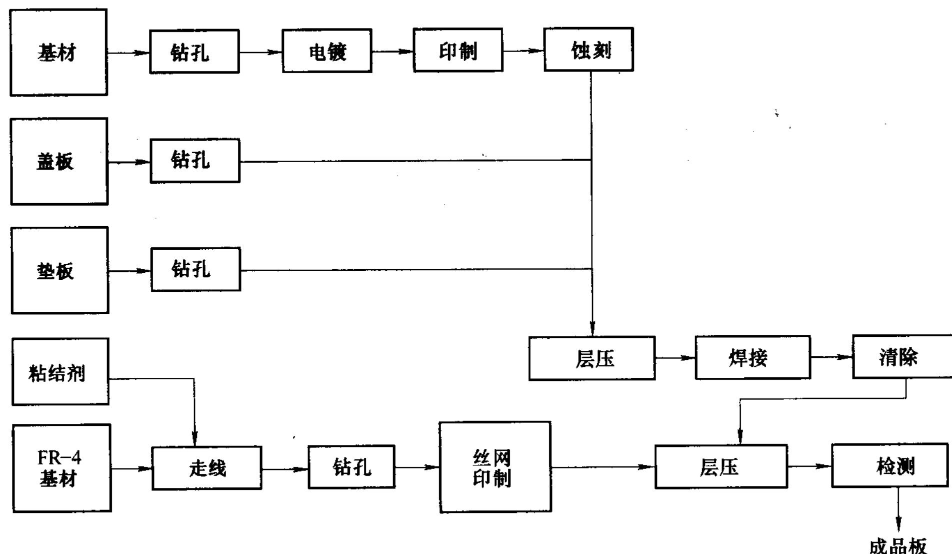


图 12-15　制造印制电路板并蚀刻柔性印制电路板的连续加工示意图（根据 www. minco. com 重绘）

个连续加工示意图，所有的生产过程在一系列顺序放置的机器中完成。丝网印制或许不是这个连续传送过程的一部分，这造成了在线过程的中断。

通常，由于基材有限的抗热性，柔性印制电路中的焊接就显得更为重要。手工焊接需要足够的经验，因此如果可能，应该使用波峰焊接。焊接柔性印制电路时，应该注意以下事项：

1）因为聚酰亚胺具有吸湿性，在焊接之前电路一定要被烘烤过（在 250°F 中持续 1h）。

2）焊盘被放置在大的导体区域，例如接地层、电源层或散热器上，应该减小散热区域，如图 12-16 所示。这样便限制了热量散发，使焊接更加容易。

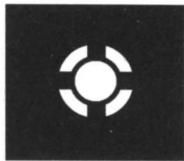


图 12-16　减小焊盘周围的焊接区域

3）当在密集的地方进行手工焊接引脚时，应设法不去连续焊接邻近的引脚，来回移动焊接，以避免局部过热。

关于柔性印制电路的设计和加工信息可以从几个消息来源中获得，然而最好的信息源总是加工材料和化学药品的生产者/供应者。通过供应者提供的信息，加之加工专家的科学经验，就能生产出高质量的柔性印制电路板。

12.5　硬软合板

在印制电路板技术中，硬软合板构成了一个混合的系统，其制作过程使用标准的多基板技术和柔性印制电路板的标准制作方法，各种不同的层相互结合碾压在一起，成层以后进行钻孔，然后电镀，实现不同层间的电气连接。刚柔组合去除了跳线和母子板结合的需要，因此当增加封装密度时，减少了配线错误。

刚柔组合的材料选择是非常重要的，因为所有的组成部分都必须保证在处理过程中不受破坏。需要仔细考虑的是，由于使用柔性印制电路会引起 $x-y$ 方向的空间变化，层的堆叠会引起 z 轴方向的垂直压力上升，当材料被暴露对于最后的成层和锡钎焊温度时，材料的这种变形可能引起铜孔桶状破裂。

刚柔合成电路的处理包括四个难点：成层、钻孔、粘结剂的去除和孔的电镀。在钻孔中，必须保证所有层中的所有相连的焊盘的中心正确对准。从孔中除去粘结剂污点可能引起孔破裂或不同层间的对不准。这些问题只能通过细心的操作来克服。

把所有的硬软组成部分放到一起之后，接下来的步骤就是把柔性印制电路和刚性印制电路结合在一起。因为大部分的组成部分是由相似的材料组成的，所以操作起来比较困难。许多公司使用标准的滚筒压力，而现在则趋向于使用真空压合。柔性和刚性材料的供应者通常根据需求提供技术援助来完成这个过程。

接下来的步骤是成层后的钻孔，因为有许多不同的材料要求钻孔，应该使

用最好的设备和钻。钻孔完成之后，堆叠材料的孔应该被清洗，以便于后来的镀铜过程顺利进行，从而使得镀通孔不出现裂纹或镀不完全的地方。用环氧树脂基材制作的系统通过硫酸进行清洗，使用丙烯酸基材的系统通过等离子回蚀系统清洗。

钻孔和清洗之后，用无电镀的铜进行镀铜，在顶层/底层按照蚀刻的图样放置保护层。在最终的表面和孔的电解电镀完成后，对制成板进行镀锡。然后，保护层被去除，电镀的焊料变成新的保护层。最后通过蚀刻去除多余的铜。

多层硬软结合板的公差把握常常比较困难。因此，在硬软系统中最好尽可能地限制板的层数。

12.6 终端装置

柔性印制电路有多种可能的终端装置（www. minco. com），下面讨论一些最常见的终端：

1. 连接器

在柔性印制电路中，连接器可以通过手工焊接、波峰焊接，或在绝缘体置换连接器的情况下进行卷边处理（见图 12-17）。连接器可以被放在附加装置中，或用环氧树脂、聚亚胺酯等涂层，起到保护和绝缘的作用。在许多应用中，扁平连接器是一个不错的选择。

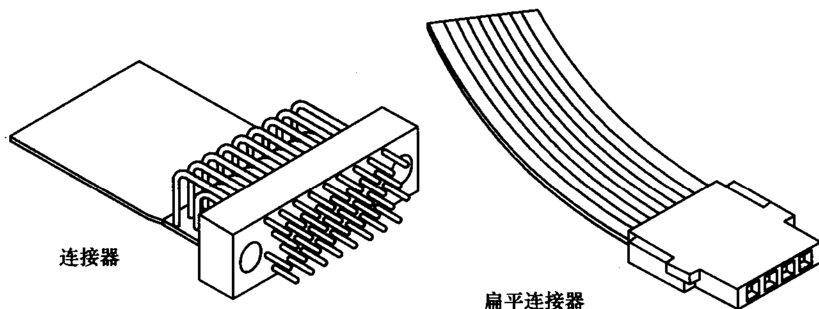


图 12-17 柔性印制电路中使用的扁平连接器

2. 金手指

金手指可能被支撑或不被支撑，如图 12-18 所示。

3. 引脚

插座的引脚可以被加压就位，然后焊接。在型锻[⊖]程序之后，电路引脚也可能被型锻并被焊接，引脚也有可能被型锻（见图 12-19）到 FR-4 的加强板上，

⊖ 型锻（Swaging），或模锻，即锻压（元器件）端头。——译者注

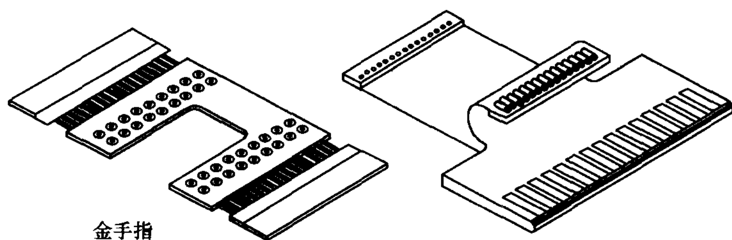


图 12-18　柔性印制电路中使用的金手指

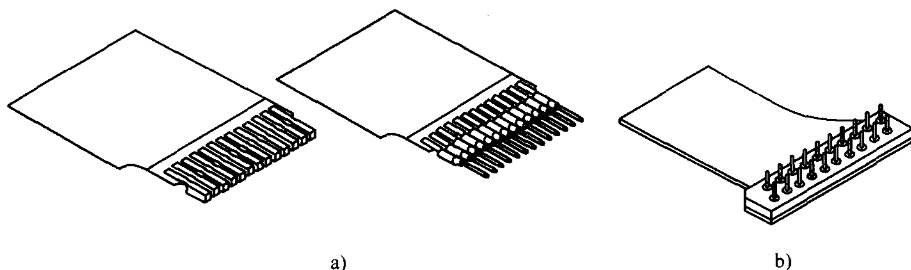


图 12-19　卷边的引脚和插座与有加强板的嵌入式引脚
a）卷边的引脚和插座　b）有加强板的嵌入式引脚

然后被焊接。

也可以采用应用定位焊接技术（熔点为 618℃）的铜焊引脚和带状电缆，这样可以为以后的组装提供一个可焊面。

与导体成一条直线的末端引脚可以铜焊、焊接或向导体处卷边。插脚能够形成一个交错的排列，如图 12-20 所示。

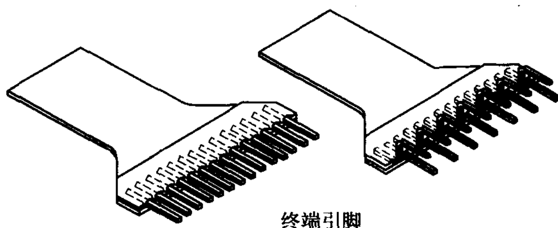


图 12-20　柔性印制电路的终端引脚

4. 重叠接缝

柔性印制电路可经过焊接的重叠接缝和刚性板交接，重叠接缝可以是各向异性粘结剂（仅在 z 轴方向传导）、密集凸起的金属圆点或斑马条。密集凸起的金属圆点的方法通常在连接区域后面需要一个增强板。

12.7　柔性印制电路的优点

柔性印制电路可以解决电子产品中最小化设计/封装问题。以下是在这些方面具有的独特优点：

1）用一个柔性印制电路或硬软电路代替多层刚性板和连接器。

2）代替刚性板/带状电缆装备。

3）用实心的或图案防护层控制电磁干扰。

4）用完整的接地层控制阻抗。

5）对于太窄的布线区域通过气隙提供电气连接。

6）对于使用导电橡胶键座的电路采用导电体外露的设计方式。

7）把加热器、温度传感器或线饶天线卷结合进柔性印制电路中。

8）使用柔性印制电路作为刚性板间的跳线。

9）指定压敏导电胶将电路粘接于机壳或围栏上。

基于所有这些优点，柔性印制电路已经在一些至关重要的领域得以应用，如军事和航空领域、医学领域以及商业领域的应用。

12.8 柔性印制电路的特殊应用

柔性印制电路有一个逐渐壮大的市场，这完全是由于它们在一些极其重要领域的应用所驱动的。一些应用列举如下。

1）柔性基材与刚性层压板相比重量轻，并且占用较少的空间。因而成为航空、军事和移动应用中的首选。

2）随着三维空间的互连和结构上的可行性，柔性印制电路在无线电通信和家用电器中的应用增长，甚至已经有了成本的实质性降低。

3）柔性印制电路可以被制成各种各样的形状，例如带状、卷状或弯曲的形状。因此，它们能用于刚性材料不能完成的机器部分，例如打印机、天线、制图机等。

4）柔性印制电路板替代了刚性电缆安全带，为现场服务提供了便利的装备。

5）与电线相比，柔性印制电路可迅速散热，因而具有较高的载流能力，提供了一个较好的体积/表面比率。

12.9 几个常用标准

1）IPC-2223：柔性印制电路板的组合设计标准。包括单面、双面、多层硬软结合或柔性印制电路需要的必备条件，包括最小弯曲半径、微分时长和板的结构。

2）IPC-6013-K：柔性印制电路板的鉴定和性能规范说明。涵盖了柔性印制电路板的鉴定和性能规范的要求，包括单面、双面或多层硬软结合板。

3）IPC-4202：柔性印制电路中柔性绝缘基板材料的使用。涵盖了对柔性印制电路和柔性扁平电缆中使用的柔性绝缘基板材料的要求，为用户提供了全面的关于材料性能和兼容性方面的数据，以便于选择使用。

4）IPC-4203：用于柔性印制电路的粘结剂涂层绝缘薄膜，以及柔性粘接薄膜。制订了用于制造柔性印制电路和柔性扁平电缆的粘结剂涂层绝缘薄膜和柔性粘接薄膜材料的要求，为用户提供全面的关于材料性能和兼容性方面的数据，以便于选择使用。

5）IPC-4204：用于制造柔性印制电路的柔性金属包覆绝缘体。包括制造柔性印制电路和柔性扁平电缆中，对使用的金属包覆绝缘体的要求。

6）IPC/JPCA-6202：单、双面柔性印制电路板性能手册。包括对单、双面柔性印制电路板的要求和注意事项。

7）IPC-FA-251：单、双面柔性印制电路组装的指导原则。包括对单面和双面柔性印制电路的元器件组装和部件安装的指导原则，以及材料的类型和实现正确的电子组装的方法。

8）IPC-FC-234：单、双面印制电路压敏粘结剂（PSA）的组装指导原则，以及建议在单面或双面柔性印制电路、薄膜开关和组件的附件中使用的压敏粘结剂的指导原则。

第13章　焊接、装配与再加工技术

13.1　什么是焊接

焊接就是利用各种可熔的合金（焊锡）连接金属部件的过程。焊锡的熔点比被焊材料的低，这样部件就会在不被熔化的情况下，通过其表面产生分子间的结合完成焊接。

焊接可以分为软焊接和硬焊接，软焊接温度低于450℃，硬焊接高于450℃。硬焊接通常用于银、金、钢、铜等金属，其焊接点比软焊接牢固得多，抗剪强度为软焊接的20～30倍。以上两种热连接通常均使用焊接这一术语，因为两例中均为将熔融的焊锡注入到两个待装配的清洁且靠近的固体金属表面的细长缝隙中。

焊接保证了金属的连续性。一方面，两种金属相互之间通过螺栓连接或物理附着结合在一起，表现为一个结实的金属整体，但这种连接是不连续的，有时金属的表面如果有氧化物绝缘膜，则它们甚至是非物理接触的。机械连接与焊接相比的另一个缺点是接触面继续发生氧化作用而导致电阻的增加。另外，震动和其他机械冲击也可能使接头松动。焊接则消除了这些问题，焊接部位不发生相对移动，接触面不会氧化，连续的导电路径得以维持。焊接是两种金属间的融合过程，焊锡在熔融状态下，将溶解部分与之相接触的金属，而被焊接的金属表面则常常有一薄层焊锡不能溶解的氧化膜，助焊剂就是用来去除这层氧化膜的。焊接过程通常包括：

1）助焊剂的熔化，进而去除被焊金属表面的氧化膜；

2）熔化焊锡使悬浮于其中的不纯净物质及较轻的助焊剂浮到表面；

3）部分地溶解一些与焊锡相连接的金属；

4）冷却并完成金属与焊锡的熔融。

经常为了定位电路功能出现的问题，需要将元器件从印制电路板上取下来进行必要的测量，这一修理过程通常包括：

1）特殊元器件的拆卸；

2）元器件的测试；

3）有缺陷元器件的替换；

4）测试检查电路性能。

摘取和替换电子元器件这一操作中，就需要实施焊接过程。

太空、国防、医疗电子、交通控制系统、通信系统以及监视与控制系统设备的可靠、成功的运行都依赖于良好的焊接。在残酷和敌对的环境条件下，例如温度的变化、潮湿、振动等，甚至一个不良的焊接点就可能导致系统部分或全部的失控。设备中有成千上万的焊接点，这些焊接点的可靠程度甚至应当比设备本身更高。有关这方面的研究已经导致了材料及其性质的知识的增长，在可能的焊接工艺上取得了许多进展。焊接技术是一门伴随技术，随着电子工业的发展，必然不断地产生更多的有效封装技术以及更小的元器件，焊接技术也将不断地发展来满足电子工业和环境议题变化的需求。这就是为什么现在对于工作在电子工业领域的科技专家来说焊接变得越来越专业的原因。

13.2　焊接理论

为了形象地理解焊接点形成时所发生的变化，掌握一定的焊接理论是必不可少的。焊接并不是一块金属与另一块金属简单的物理连接，而是在化学上形成了分子间键。焊接过程中有许多重要的变数，为了得到良好的焊接结果就要对其进行控制。

13.2.1　沾锡作用

当热的液态焊锡溶解并渗透到被焊接的金属表面时，就称为金属的沾锡或金属被沾锡。焊锡与铜的混合物的分子形成一种新的部分是铜、部分是焊锡的合金，这种溶媒作用称为沾锡，它在各个部分之间构成分子间键，生成一种金属合金共化物。良好的分子间键的形成是焊接工艺的核心，它决定了焊接点的强度和质量。只有铜的表面没有污染，没有由于暴露在空气中形成的氧化膜才能沾锡，并且焊锡与工作表面需要达到适当的温度。

13.2.2　表面张力

大家都熟悉水的表面张力，这种力使涂有油脂的金属板上的冷水滴保持球状，这是由于在此例中，使固体表面上液体趋于扩散的附着力小于其内聚力。用温水和清洁剂清洗来减小其表面张力，水将浸润涂有油脂的金属板而向外流形成一个薄层，如果附着力大于内聚力就会发生这种情况。

锡-铅焊锡的内聚力甚至比水更大，使焊锡呈球体，以使其表面积最小化（同样体积情况下，球体与其他几何外形相比具有最小的表面积，用以满足最低能量状态的需求）。助焊剂的作用类似于清洁剂对涂有油脂的金属板的作用，另外，表面张力还高度依赖于表面的清洁程度与温度，只有附着能量远大于表面

能量（内聚力）时，才能发生理想的沾锡。

13.2.3 金属合金共化物的产生

铜和锡的金属间键形成了晶粒，晶粒的形状和大小取决于焊接时温度的持续时间和强度。焊接时较少的热量可形成精细的晶状结构，形成具有最佳强度的优良焊接点。反应时间过长，不管是由于焊接时间过长还是由于温度过高或是两者兼有，都会导致粗糙的晶状结构，该结构是砂砾质的且发脆，切变强度较小。

采用铜作为金属基材，锡-铅作为焊锡合金，铅与铜不会形成任何金属合金共化物，然而锡可以渗透到铜中，锡和铜的分子间键在焊锡和金属的连接面形成金属合金共化物 Cu_3Sn 和 Cu_6Sn_5，如图 13-1 所示。

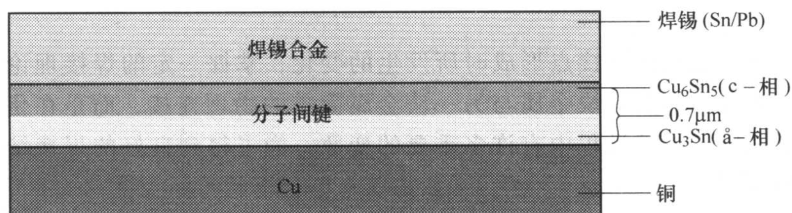


图 13-1 分子间键的形成

金属合金层（n 相 + ε 相）必须非常薄，激光焊接中，金属合金层厚度的数量级为 0.1mm，波峰焊与手工烙铁焊中，优良焊接点的金属间键的厚度多数超过 0.5μm。由于焊接点的切变强度随着金属合金层厚度的增加而减小，故常常试着将金属合金层的厚度保持在 1μm 以下，这可以通过使焊接的时间尽可能的短来实现。

金属合金共化物层的厚度依赖于形成焊接点的温度和时间，理想的情况下，焊接应在 220℃ 约 2s 内完成，在该条件下，铜和锡的化学扩散反应将产生适量的金属合金结合材料 Cu_3Sn 和 Cu_6Sn_5，厚度约为 0.5μm。不充分的金属间键，常见于冷焊接点或焊接时没有升高到适当温度的焊接点，它可能导致焊接面的切断。相反，太厚的金属合金层，常见于过度加热或焊接太长时间的焊接点，它将导致焊接点抗张强度非常弱，如图 13-2 所示。

13.2.4 沾锡角

比焊锡的共晶点温度高出大约 35℃ 时，当一滴焊锡放置于热的涂有助焊剂的表面上时，就形成了一个弯月面，在某种程度上，金属表面沾锡的能力可以

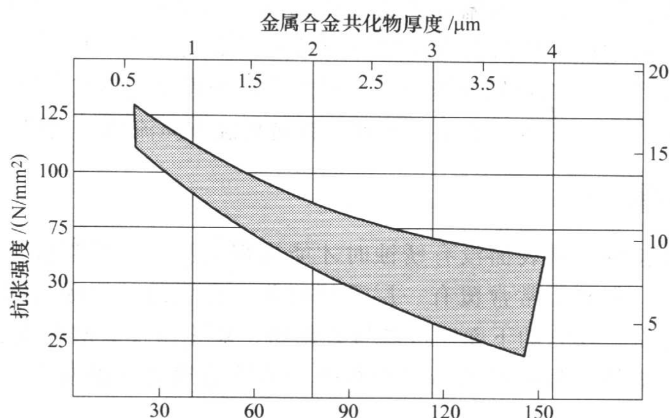


图 13-2　抗张强度与金属合金共化物厚度的关系曲线
（经佳能公司同意，2001）

通过弯月面的形状来评估。如果焊锡弯月面有一个明显的底切边，形如涂有油脂的金属板上的水珠，或者甚至趋于球形，则金属为不可焊接的。只有弯月面拉伸成一个小于 30°的小角度才具有良好的焊接性。

13.3　焊接变量

重要的焊接变量有温度、时间、表面的除锈、合适的助焊剂和适当的焊锡。这些变量对所有的焊接技术都很重要，应当牢记于心。获得良好焊接点的方法是：“对焊锡以及准备焊接的焊垫和接线端使用适当的温度，采用恰当的助焊剂和正确的焊锡，在清洁的表面作用适当的时间，就会得到明亮有光泽的良好焊接点。”

13.3.1　焊接所用的温度和时间

焊接时的温度与加热的时间决定了金属合金共化物层的厚度，由于金属合金层的脆弱性，该层太厚时则在热应力和机械应力条件下会发生焊锡裂纹，另外，太厚的金属合金共化物、过高的温度和长时间的加热也会破坏热敏感性元器件和电路板，应保持尽可能低的焊接温度和尽可能短的高温焊接时间。对于 SMD，抗张强度是非常关键的，由于板子和元器件各部分的热膨胀系数不同，温度变化将导致其长度的变化不一样，特别是对于较大的元器件来讲，将产生剪切力。

焊接的温度有赖于焊锡的熔点及其使用。对于每一种金属与焊锡的共化物

都有一个临界温度，低于该温度不会发生沾锡或沾锡只在很小的区域发生，凭经验，回流焊接过程中的温度应该比焊锡熔点的温度高出 30～50℃，波峰焊接应高出 45～60℃，手工烙铁焊接的起点温度应该比焊锡的熔点高出 85℃。

焊接时应当均匀加热，这是由于焊锡有向高温方向流动的趋势。

13.3.2 表面除锈

只有被焊接的金属表面没有锈蚀时才能被焊锡浸润，尽管被焊金属表面看起来是干净的，但其上常常覆有一层薄氧化膜，金属的外层吸收水分和各种气体发生物理结合，在它的下面还可能与氧化物、硫化物及碳酸盐发生化学结合。良好的焊接在焊接过程中必须借助助焊剂来去除金属表面的灰尘、油脂和氧化物。

13.3.3 合适的助焊剂和焊锡的使用

助焊剂用来去除金属基材上的锈迹，并且在焊接过程中防止其再次生成氧化物，助焊剂的这种去除氧化物的功效称为“活化”，依赖于所使用的活化剂。非常活跃的助焊剂能够去除氧化物，但这些理想的去除锈迹反应层的酸性物质的腐蚀性也会破坏电子元器件，即使是弱酸，若不将其去除，其残留物在焊接过程完成后会继续侵蚀元器件，产生故障隐患。助焊剂的选择依据焊接的过程、被焊接的金属和金属的清洁程度来选择。

焊锡塑性区的变化依赖于形成焊锡合金的金属的比例，例如锡和铅。以 63/37 的比例构成的焊锡称为共晶软焊锡，它实际上没有塑性区，在 183℃时迅速熔化，因此很受欢迎。另外，焊锡的纯度也很重要，通常软焊锡中混有 0.5% 以上的杂质就不能达到质量标准。

13.4 焊接材料

焊接过程基本上包括以下几个条件：

1）焊接材料（焊锡与助焊剂）；

2）焊接工具；

3）焊接程序。

下面就具体描述每一项内容。

13.4.1 焊锡

焊接材料或焊锡通常用来将两种或多种金属连接起来，在其熔点以下是一种可熔的合金，主要由铅（37%）和锡（63%）组成，有时为了改变合金的物

理性质，可能添加不定量的锑、铋、银或镉。

软焊接完成的两种金属间的持续连接是牢固的，这种焊接依靠金属溶剂或金属合金溶液，焊接作用发生在比较低的温度。图 13-3 为表示焊锡温度与物理状态关系的阶段图，它给出了锡-铅合金熔化图，解释了合金或熔融焊锡的熔解作用。纯铅金属在 327℃时熔化，纯锡金属在 232℃时熔化。

铅中加入锡后，如图 13-3 可见，随着由 P 到 R 的曲线铅的熔点变得更低，同样在锡中加入铅，则其熔化温度随着由 Q 到 R 的曲线下降，在 PR 和 QR 两条曲线相交的 R 点，铅-锡合金获得最低的熔点，R 点表示的合金中铅占 63%，锡占 37%。该点的合金称作共晶成分，其熔点为 183℃。共晶合金直接由固相线进入液相线而不穿过塑性区，这种焊锡简称为 SN63。

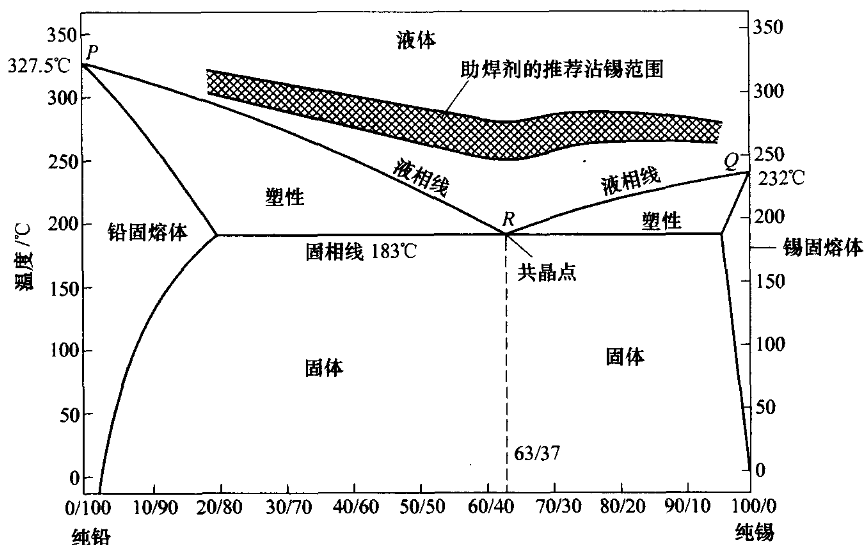


图 13-3　锡-铅焊锡熔化阶段图（经 Kaskard 同意，1997）

在电子焊接工作中一种最普遍使用的焊锡是采用 60% 的锡与 40% 的铅组成的锡-铅合金，将该合金拉成中空的金属丝，其内部填充一种称为松香的有机糊剂材料，最终产品就称为 60/40 松香硬芯焊锡，其熔点为 375°F（190℃），冷却后凝固。这种焊锡被制成各种规格的金属丝状以供使用，通常较细的规格比较粗的规格更受欢迎，良好的焊锡很容易放置于节点上且形成焊接点时需要较少的热量。

可购买的焊锡合金丝的直径从 0.25 ~ 1.25mm 不等，通常 20 ~ 22 标准线规（SWG）的直径在 0.71 ~ 0.91mm 之间，适用于大多数的焊接工作，选择 18 SWG 的焊锡丝焊接较大焊接点时会耗费更多的焊锡。焊锡丝中助焊剂的容量约

占25%，其相应的重量约占3%。

对于SN63来讲，焊接点的应力抗性是最大的，也就是说，合金的熔点越低，就有越强的拉拔强度。

另外几种合金也表现出了共晶性质，但它们有某些缺点，特别是其中含有银时就要贵得多（锡占62.5%，铅占36.1%，银占1.4%），然而对于特殊的应用，需要使用某些含有1.5%～5%银的具有高熔点或低熔点的特殊焊锡丝。到制造商代理处购买焊锡丝是一个不错的选择，这是由于合金以及助焊剂的组成在生产时可能会有偏离，这对于产品常常是非常有害的。

焊锡中含有的铅不会引起对健康的危害，但在处理铅尘时必须使用防护罩，焊接过程中吸烟可能导致吸入含有铅的烟尘，这必须加以避免，另外就是在焊接后吃饭或吸烟之前必须彻底清洗双手。

13.4.1.1　焊锡合金的选择

尽管锡60/铅40这种焊锡比较便宜且占有很大的市场，但进行高质量的焊接时采用锡63/铅37更可取，因为其具有下列优点：

1）锡60/铅40合金的熔点比锡63/铅37高出5℃，这就意味着其焊接温度范围也高出5℃，这将导致较高的能量消耗。

2）共晶合金锡63/铅37在冷却过程中，直接从液态转变为固态的速度更快，固化的时间大约比锡60/铅40合金少40%，太慢的固化由于固化过程中的振动有造成不可靠焊接点的危险。

3）锡63/铅37的抗张强度和切变强度比锡60/铅40合金更高。

4）只有锡可以与铜构成分子间键形成Cu_3Sn和Cu_6Sn_5，所以锡的含量高会更好。

5）锡63/铅37的重量比锡60/铅40的小，可以使设备更轻巧。

6）更高的锡含量增加导电性和导热性，同时还增加焊接点的光洁度。

13.4.1.2　焊锡丝/松香硬芯焊锡丝

用于手工焊接的焊锡丝通常与助焊剂结合在一起，可塑性的助焊剂置于焊锡丝本身内部的1条、3条或5条管径中。助焊剂与焊锡的比例可以用体积或重量来衡量，松香硬芯焊锡丝松香的含量多数为总质量的2%～3.5%，总体积的20%～30%。

除了助焊剂与焊锡的比例，焊锡丝的直径对于良好的焊接也非常重要，故正确的选择焊锡丝的直径是必要的。对于一般的设备，选用焊锡丝的直径应略小于焊垫直径的一半，维护工程师多使用两种松香芯焊锡丝，一种直径为0.6mm或0.65mm（或0.025in），另一种直径为0.80mm或0.90mm（或0.035in）。焊锡丝芯中的助焊剂为固态物或胶冻状物，以防止保存时助焊剂流出。

13.4.1.3　锡-铅焊锡可允许的不纯净度标准

焊锡的纯净度要比锡与铅的精确比例重要的多，因为焊锡的不纯净对焊接点的质量有实质的影响。例如，铜和金构成金属间键，导致焊接点的砂砾质且发脆，其共化物的存在不能超过 0.300%。

锌是一种最有害的焊锡污染物，0.005% 的锌就会导致砂砾质、缺乏附着力，最终导致焊接失败。

铝、镉、锌和磷促使焊接点表面氧化，对沾锡能力也有极度负面的影响。像铋、锑等混合晶状金属的负面影响较小，甚至可能会提高沾锡能力，这也是对它们提出的限制较少的原因。

污染物的来源首先是组成焊锡的合金本身是不纯净的，污染物的另一个来源是准备焊接的板子和元器件，此时外部金属很容易熔进焊锡。既然焊接过程本身就是一个污染源，这就需要特别注意对焊接槽的不断观察和分析。

对普通软焊锡的组成来讲国家标准是有效的，例如德国的 DIN1707 和美国的 QQ-571d，许多电子部件制造商都参照这些规范。表 13-1 概括给出了污染物的极限。

表 13-1　焊锡污染物的极限（经 Braun 同意，2003）

污染物	QQ-S-571/JISZ-3282①	新焊锡（%）	污染物限制②（%）
铝	0.005	0.003	0.006
锑	0.500/0.300	0.300	—
砷	0.030	0.020	0.030
铋	0.200/0.050	0.006	—
镉	0.005	0.001	0.005
铜	0.080/0.050	0.010	0.250
金	0.080/0.001	0.001	0.080
铁	0.020/0.030	0.001	0.020
银	0.010/0.001	0.002	0.010
锌	0.005	0.001	0.005
其他	0.080/0.010	0.010	0.080

① 该限制建立在联邦规范 QQ-S571-E 基础上，给出可接受的各种金属污染物的极限。

② 该项表示焊锡的污染物极限。

13.4.2　助焊剂

为了帮助焊接，常采用一种称为助焊剂的物质，用来去除被焊接金属表面

一层细小的氧化膜，并形成一层保护膜以阻止当连接点被加热到焊锡熔点时金属表面被再次氧化。助焊剂对不接受焊锡的难熔化的焊接点是有帮助的。即使在室温条件下，大多数金属趋向于与空气中的氧气发生化合反应，从而在金属表面留下一层氧化膜。氧化物可以在焊接温度下被液态的助焊剂去除，助焊剂与氧化物发生化学反应并驱散反应产物。在焊接前或焊接中应用助焊剂，这样良好的助焊剂就可以同时完成一系列的重要功能，例如提高焊接点区域的热传导能力、增强基金属的沾锡能力，以及在焊接温度下阻止金属表面的氧化。(Nasta 和 Peebles，1995)。

助焊剂实质上有以下三个主要功能：

1) 去除将要焊接的金属表面的锈蚀薄膜。

2) 在加热过程中防止基金属再次暴露在空气中的氧气中以避免氧化，这意味着当被加热到焊接温度进行焊接时通过阻止基金属与氧气的接触来提高其沾锡能力。

3) 帮助热量到被焊接金属的传递。

多数电子焊接工作使用的焊锡丝都包含这种助焊剂作为硬芯填料，助焊剂的熔点比焊锡本身低，当用熔化的助焊剂清洁金属时，它允许焊锡浸润金属并使氧化物悬浮于溶液中。

这样熔化的焊锡就可以与清洁的金属相接触，金属表面焊锡的溶解作用就可以发生了。

为了正确地发挥其作用，助焊剂必须具有以下几个优良的性质：

1) 能够正确地应用在被焊金属的表面，在该状态下必须是可利用的（硬芯焊锡丝；波峰焊接中为液态；回流焊接中作为膏剂）。

2) 为了浸润所有被焊金属表面，助焊剂必须具有较低的表面张力，也就是说，它应当能够渗入有时存在于被焊金属表面间的细小缝隙。

3) 必须能够破坏锈蚀层（分解吸附层并去除反应层）。

4) 应当在 80 ~ 100℃时起作用，而且在涂上助焊剂后不立即起作用。

5) 在焊接持续的整个过程中保护金属表面。

6) 助焊剂本身及其挥发性产物中没有毒性。

7) 在焊接装配过程中理想的助焊剂不应有残留物。

Rubin (1995) 认为人们将很快发现无残留助焊剂和焊锡膏在焊接生产技术中具有重要的地位，其应用的增长受到 SMD 大规模应用的影响，作为靠加入氟氯碳化物完成的清洗流程的替代方案，其应用将大大增加。

13.4.2.1 助焊剂的组成

助焊剂有两种基本的成分：溶剂和固形物，如图 13-4 所示。固形物部分包括活化剂，而溶剂是主要的承载媒介。

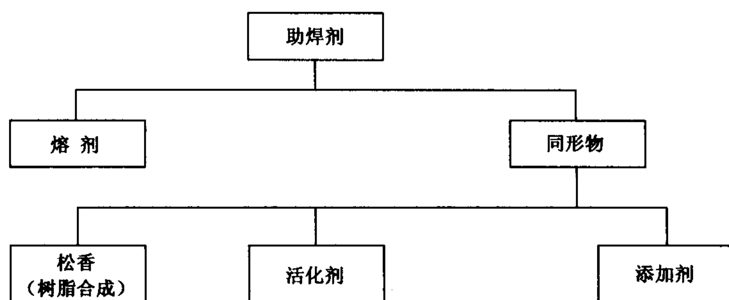


图 13-4　助焊剂的基本成分

1. 添加剂

添加剂用作润湿剂，用来减小助焊剂的表面张力以便提升其沾锡能力，也可以用作焊锡膏的泡沫调节剂或增稠剂。

2. 活化剂

活化剂是一种化合物，在焊接温度下还原分解产生氨或氢氯化物，也可能产生非卤化物，例如羟基酸等。使用强酸作活化剂会产生严重的问题，设计用来去除锈蚀反应层的酸的腐蚀性将会破坏电子元器件，即使是弱酸也会在焊接过程完成后留下残留物继续腐蚀，导致将来成品的失败。在电子工业中有两种基本的方法：一种是制造者使用带有强酸的助焊剂去除大量的氧化物，但具有较大的腐蚀性；另一种采用弱酸作助焊剂，腐蚀性较弱，且其在去除氧化层方面也不如强酸助焊剂。由于从 SMD 下面清洗助焊剂残留物有困难，助焊剂制造商已开发出一种特殊的产品，该产品如有残留，残留物也几乎不含有腐蚀性和导电性物质。某些物质与卤化物和氨的烟气不相容，有一种不含有卤化物和氨的助焊剂材料，可将其用于对这类物质进行活性焊剂处理。金属表现出很强的抗腐蚀性是由于其固有的、紧密的氧化物结构，要去除它需要很强的或活性很大的助焊剂。

3. 松香/基于树脂的助焊剂

松香助焊剂是由从松树树液中提取的松脂制成的，多通过割胶的方式从活树中提取，其分类和价格根据所提取的松树的种类及松香的纯度来决定。最纯的产品称为“无色透明松香”，其活性成分是一种有机酸（85% 是松香酸）。合成树脂也可以作为松香的等效物，活性松香/树脂助焊剂在电子工业中应用很普遍。助焊剂在环境温度下是不活跃的，只有在高温的焊接过程中才变得活跃。高活性的助焊剂能够加速焊接的过程，减少焊接时间，但随之而来的是组装、清洗费用的增加，以及对氯化和氟化碳氢化合物使用限制的增加。松香与活化剂的比例可以控制助焊剂的活性，而不是固体含量。另外除了松香与活化剂的

比例，助焊剂的固体含量（比重）也可以改变，高固体含量的助焊剂用于高密度连接的电路板。

13.4.2.2 水溶性助焊剂

水溶性助焊剂根据其基本组成可以分为两类：有机助焊剂和无机助焊剂。有机助焊剂较无机助焊剂更活跃，是所有助焊剂中最活跃的，水溶性助焊剂并不意味着溶剂媒介物本身必然是水，尽管可以用水，但容易出现飞溅现象，所以经常使用与基于树脂的助焊剂相似的溶剂。术语“水溶性助焊剂”是指所使用的化学物质通常是溶于水的。除了个别例外，所有的水溶性助焊剂都会留下残留物，焊接后必须进行仔细地清洗。总之，助焊剂是吸湿性的，含有大量的可能引起严重腐蚀的离子物质，但它可以活化电子装配中所使用的大部分金属。

13.4.2.3 助焊剂的种类

可供使用的助焊剂有多种，电子焊接中使用的不同类型的助焊剂在标准IPC-J-004 中有说明。助焊剂可归为以下三类之一，其中 L 代表低、M 代表中、H 代表高。这种分类方法是根据助焊剂的活性水平来分的，它从本质上定义了其清洗金属锈蚀的能力。表 13-2 给出了根据助焊剂材料活性水平划分的不同类型。

表 13-2 IPC-J-004 规定的助焊剂的不同类型

助焊剂类型符号	助焊剂材料的组成	符号	助焊剂活性水平[①]（卤化物）	助焊剂类型
A	松香	RO	低（0%）	L0
B			低（<0.5%）	L1
C			中（0%）	M0
D			中（0.5%~2%）	M1
E			高（0%）	H0
F			高（>2%）	H1
G	树脂	RE	低（0%）	L0
H			低（<0.5%）	L1
I			中（0%）	M0
J			中（0.5%~2%）	M1
K			高（0%）	M0
L			高（>2%）	H1
M	有机物	OR	低（0%）	L0
N			低（<0.5%）	L1
P			中（0%）	M0

（续）

助焊剂类型符号	助焊剂材料的组成	符号	助焊剂活性水平[①]（卤化物）	助焊剂类型
Q			中（0.5%～2%）	M1
R			高（0%）	H0
S			高（>2%）	H1
T	无机物	IN	低（0%）	L0
U			低（<0.5%）	L1
V			中（0%）	M0
W			中（0.5%～2%）	M1
X			高（0%）	H0
Y			高（>2%）	H1

① 本项目中原书数据有误。——译者注

13.4.2.4　硬焊接/硬钎焊使用的助焊剂

与软焊接类似，为了清洗金属表面，阻止在硬焊接过程中金属表面被氧化，硬焊接也需要使用助焊剂。助焊剂通常以膏剂的形式使用在焊接点上，膏剂用硼砂（硼酸和氯化锌）制成。使用助焊剂的类型依赖于焊锡的种类以及所焊接的金属，市场上可以买到的用于硬焊接的焊锡（铜焊条）和助焊剂有十余种，许多铜焊条有助焊剂膜或助焊剂芯，焊接时不需要再添加助焊剂。焊接工作完成后熔化的助焊剂留下深棕色的残留物，应当通过将其浸没到用水稀释的酸溶液中去除，通常是硫酸或磷酸。

应当记住的是要将酸加入到水中而不能将水加入酸中，在做这项工作时要戴上橡皮手套和护目镜。

13.5　软焊接与硬焊接

焊接就是使用金属合金（焊锡）将两块或多块金属连接在一起的过程，其中焊料的熔化温度要比被焊金属的低。焊接温度低于 450℃ 的称为软焊接，通常用于名贵珠宝首饰焊接的硬焊接（硬钎焊）温度超过 450℃。硬焊接用于焊接银、金、钢和铜等金属，其焊接点比软焊接牢固得多，其剪应力比软焊接坚固 20～30 倍。

13.5.1　硬焊接/硬钎焊的焊料

所有不含铁的金属（金、银、铜、黄铜、青铜）有较高的熔化温度，可采

用金焊料或银焊料合金进行焊接，有各种不同熔化温度、形状及构成的金焊料与银焊料可供使用。

金焊料与银焊料合金的熔化温度主要由合金中锌的含量决定，锌的含量越高，熔化温度就越低，然而，锌也使低熔化温度的银焊料合金发微黄色或灰色。当焊锡过度加热锌被耗尽时，焊锡接缝处会出现凹点，所以，使用高熔化温度的焊料或控制加热的温度可以阻止凹点的出现。用于焊接钢、铜等的硬焊料合金中含有银、铜、锌、镉等金属。

硬焊接时必须非常谨慎，危险的焊焰的火苗、加热焊料合金产生的有害的化学烟气、不良通风场地中的助焊剂都是不安全的，所以必须严格遵守设备、厂商的规定和警示。

13.6 焊接工具

为方便焊接工作需要各种工具，焊接中最重要的工具就是焊接烙铁。

13.6.1 焊接烙铁

焊接烙铁是手工焊接的基本工具，它产生所需要的热量用来加热被焊金属的表面以及熔化焊锡。

当烙铁置于被焊接的连接点上时，应当通过热传递提供充足的热量来熔化焊锡。焊接电子元器件的焊接烙铁由以下三个主要部件构成：

1） 手柄；

2） 加热部件；

3） 烙铁头。

（1） 手柄

由良好的电绝缘和热绝缘材料制成，形状符合人体工程学，以方便操作者使用。

（2） 加热部件

该部件必须具有充足的热容量以便于设定温度与工作温度尽可能的一致。达到最高发展水平的烙铁是由微处理器控制的，通过传感器检测烙铁头的温度并与设定的温度进行比较，焊接的时候加热部件对烙铁头热量的丧失立即作出响应，向烙铁头归还其损失的热量。加热部件必须有良好的绝缘，以防止烙铁头出现电泄露损害元器件。

（3） 烙铁头

该部分由铜制成以便提供良好的热传递，头部电镀以防止焊锡溶解烙铁头。由于铁不被焊锡所侵袭，所以常使用镀铁的铜头，令人遗憾的是铁不容易被焊

锡浸润，为了提供能良好沾锡的坚硬的外部表面，烙铁头常进一步镀一层镍或铬。随着时间的消逝和烙铁的使用，烙铁头外部的镍铬镀层会逐渐被溶解掉，此时必须更换烙铁头。由于烙铁头位于手工焊接烙铁的尖端，故常称为焊嘴。

传统的烙铁头由铜制成，利于导热并且便宜，然而其缺点是当加热的时候烙铁头的氧化很严重，铜离子释放到焊锡中直到烙铁头被完全腐蚀。新式的烙铁头被设计成以化学的方法产生电流进行电镀生成一层铁膜，然后在其外面施加一层铬合金防护层以防止氧化和侵蚀。烙铁的加热部件也应加以保护以防止由于过快的热传递而导致的过度加热和过早的耗损。这样的烙铁头可以从 M/sERSA 股份有限公司获得，被称为 ERSADUR 焊接头。

烙铁头的选择要根据其大小、形状、使用电压和瓦数，根据所从事的焊接工作进行烙铁的温度选择及控制，常通过使用不同功率的烙铁，偶尔也通过烙铁头的选择来进行烙铁温度的控制。

可选用的烙铁有各种形状，描述如下：

(1) 焊接笔/钎焊笔

焊接笔如图 13-5 所示，是一种轻便的焊接工具，可产生低至 12W 高达 50W 的热量。一个 25W 的焊接笔就可以很好的满足一般条件下的焊接工作，例如印制电路板上的焊接。有标准组件的烙铁使用可互换的加热部件和烙铁头与焊笔主体来匹配，这些部件可以旋入位于焊笔末端的带有螺纹的插座中。各种烙铁头如图 13-6 所示，可用来处理大部分的焊接任务。非常精细的、几乎是针状的烙铁头可用于带有集成电路组件金属箔焊垫的焊接，这些焊垫的距离非常近；更大一些的、凿状和棱锥烙铁头可以存储、传导更多的热量，可用于更大的、更宽距离的焊接点；弯凿类烙铁头可以到达一些很难接触到的焊接区域。不考虑烙铁头的类型时，最好使用经过电镀的烙铁头，与粗铜烙铁头相比，前者有更长的使用寿命。

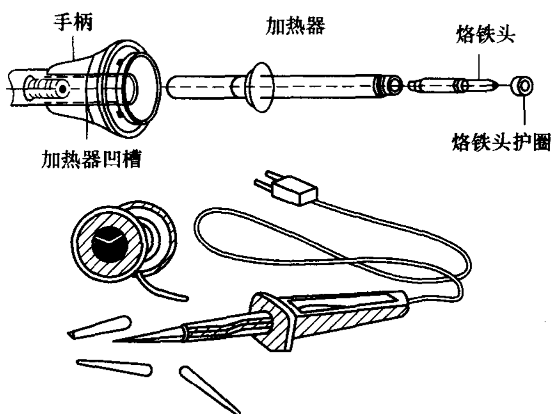


图 13-5　铅笔式焊接烙铁

焊笔类型的烙铁达到工作温度需要几分钟的时间，故即使在断续类型的焊接工作中也最好保持连续的供电，这就需要将烙铁妥善保管到处于工作温度且安全的地方。一种办法是将其放置于一个特制的可将热的烙铁插入的卷状钢丝



图 13-6　不同类型的焊接烙铁头

烙铁支架中，多数这种类型的焊接台还包括一块海绵，用来周期性地清洁烙铁头并保持湿润。

（2）焊接枪

焊接枪通常较重，较普通的焊笔产生更多的热量，任务较重的导体与接头的焊接需要使用焊接枪，因为它可以产生足够的热量将较大的金属焊接点迅速提升到适当的焊接温度。这种焊接工具称为焊接枪只是因为其外形类似手枪，焊接枪如图 13-7 所示，其扳机实际上是控制交流电施加到加热部件的一个开关。其工作温度的提升是瞬间的，有些焊接枪通过多位置的扳机开关提供不同热量等级的选择。



图 13-7　焊接枪

（3）焊接台

焊接台如图 13-8 所示，包括烙铁和控制台。控制台上有可以选择温度的开关，标注着低、中、高三档，显然，这比使用有标准组件的焊笔要方便得多。后者要等着加热部件的冷却，将其从固定器中旋出，然后与另一个烙铁头替换。焊接台烙铁头的温度控制通过使用热传感器和闭环反馈控制加热部件来完成，显然，焊接台与焊接笔相比要贵得多。

（4）电池供电的烙铁

有时，依靠电力网供电来操作烙铁是不方便的，此时可使用电池供电的烙铁，它依靠可充电电池作为电源，当烙铁放置在修建在焊接台上与交流电源相连接的充电器中时，再充电就会自动进行。这种烙铁的烙铁头可在 5～8s 内达到工作温度，在 1s 左右冷却到环境温度。一般情况下，充电一次大约可进行 125 次焊接，对于标准的烙铁，使电池恢复到足额的典型充电时间大约是 14h，当

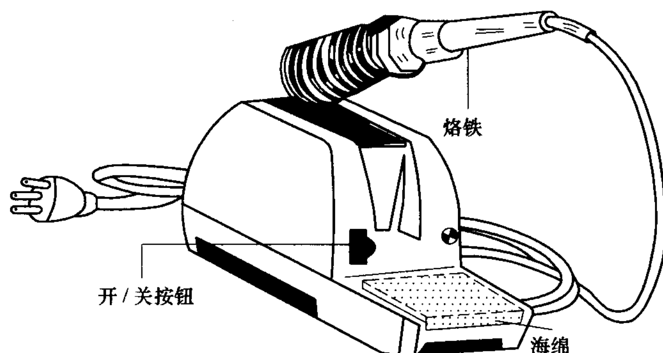


图 13-8　焊接台

然，也有快速充电烙铁。有时，烙铁有一个安装在内部的照明灯，它可以在电池给烙铁加热部件供电时为工作区域提供照明。

烙铁最好与耐热的台架型支撑座一同使用，以便于烙铁在使用过程中安全地放置，焊接台就有此功能。否则，就需要一个单独的烙铁架，若有一个放置清洗烙铁头的海绵的支架会更好。

电子设备目录中常包括许多知名品牌的烙铁，当为了特殊的应用选择焊接烙铁时应牢记以下几个因素：

1）电压：多数焊接烙铁由电力网供电的电压是 230V，但也有低电压型烙铁，其供电电压为 12V 或 24V，通常这些低电压型烙铁也是焊接台必不可少的组成部分。

2）瓦数：烙铁典型的额定功率在 15 ~ 25W 之间，可以满足绝大多数的工作。更高的瓦数并不意味着烙铁的加热温度会更高，仅仅是其为焊接较大的焊接点而储存了更多的能量而已，由于高瓦数的烙铁冷却较慢，它常用于焊接任务较重的工作。

3）温度控制：最简单、最便宜的焊接烙铁不含有任何形式的温度控制，对多数使用者来讲，不需要调整的烙铁是理想的通用烙铁，通常它完全能够处理印制电路板、焊接及连线。

温度控制烙铁有一个内置的温度调节装置，以使烙铁头的温度维持在一个预先规定好的固定水平，特别是在频繁使用中这种烙铁很受欢迎，它有助于保证不出现偶尔的温度过冲，使输出的温度保持相对稳定。有些烙铁还有内嵌的数字式温度读数显示器以及可改变的温度设置控制旋钮。可使用 K 型热电偶来测量烙铁头的温度并通过晶闸管控制加热速率，这样就可以提升温度来焊接更大的焊接点。需要利用尽可能靠近烙铁头端点的传感器来测量温度是快速反应的一个基本原则，选择的测量点越靠近烙铁头的端点，控制系统的反应

就越快。

4）抗静电保护：焊接像 COMS 和 MOSFET 晶体管这类静态灵敏器件时，需要使用其结构中含有静态耗散材料的特殊焊接台，这类烙铁能够保证静态放电不建立在烙铁自身上，是“静态放电保险的”（防静态放电的）。

通用焊接烙铁不一定必然是防静态放电的，但如果在处理 CMOS 器件时采取通常的抗静电预防措施就可以安全地使用。此时，烙铁头需要良好的接地。

5）烙铁头：可供使用的烙铁头有各种各样的形状和尺寸，需要牢记于心的是烙铁螺钉刀头部的尺寸应当与焊垫的直径大约相等，需要有大量的烙铁头以及焊接烙铁可供选用，以便有最大的选择灵活性来满足需求。

烙铁头的选择非常重要，其末端的形状必须使热量良好地传递到将要焊接的部位。

烙铁头的使用寿命有赖于其所用材料的厚度与结构，与其被正确的使用也有关系。

从几个制造商处获得不同直径和形状的烙铁头以及焊接烙铁是很有用的，这样就可以根据手中不同的焊接工作做不同的选择。

6）烙铁头的保养：应当用蘸水的海绵擦拭烙铁头来去除过多的焊锡和熔化的助焊剂，对烙铁头进行良好保养时应牢记以下几点：

① 不要用锉或其他任何研磨工具清洁烙铁头，甚至不能使用铜刷。

② 不要紧靠着将要焊接的金属表面清洁擦拭烙铁头。

③ 关掉烙铁电源时将烙铁头清洁并镀锡。

④ 超过 15min 不使用烙铁时要关闭烙铁的电源。

⑤ 焊接工作结束时用硬芯焊锡丝清洁浸润烙铁头。

⑥ 将所有的焊接烙铁放在其各自的支架上，每一个支架上不要放置一个以上的烙铁。

⑦ 不要将烙铁头以任何形式包裹，应将其置于敞开的弹簧支架上。

7）备件：保证烙铁可以随时获得备件是更可取的，如果某一部件被烧坏，不必更换整个烙铁，对于昂贵的烙铁更是这样。

13.6.1.1 焊接烙铁的选择

焊接烙铁是一种精密、小巧但却很有效的将元器件焊接到印制电路板上的可靠工具。一种带有镀镍烙铁头的、功率在 25～40W 之间的、烙铁头温度达到 205℃的微型烙铁最为常用。烙铁头过高的温度会烧坏铜箔与电路板的粘接接头，故烙铁头应适当镀锡，且温度不能过高。

理想的烙铁头就是一个大约为 2.5mm 的扁平状或凿状的尖头，老式的没有镀铜的烙铁头由于其容易磨损，现在已经不再使用了。

每次使用前应仔细地检查焊接烙铁，烙铁头应当正确的连接或旋进固定器

中并除去其表面的氧化物，而且烙铁头的形状必须满足所执行焊接任务的需要，如果上述任何一条不满足，则应当采用如下步骤：

1）使用研磨布或砂纸去除烙铁头表面的氧化物。

2）可以用锉将烙铁头修正成所需的适当形状，通常未镀铜的烙铁头可以这样做。

3）将烙铁加热到焊锡熔化的最低温度点，焊接前，将烙铁头放在几毫米厚的焊锡上使其镀上一层较薄的焊锡。

4）为保持烙铁头清洁，在做好各项准备工作后，应当用蘸湿的海绵擦拭烙铁头的加热表面，以去除灰尘、油脂和助焊剂，如果有残留，它们就会成为焊接点的一部分而导致焊接点干燥、有缺陷。

焊接过程中，烙铁头产生过多的热量会导致元器件超过其可承受的最高温度，元器件可能会永久的损坏、削弱或其价值及性能受到严重的影响，这些影响在装配过程中可能不被发现或检测到，而在设备使用过程中会导致性能下降。

必须基于基板的温度极限来选择烙铁头的温度。由可耐受温度为 280℃ 的纤维玻璃树脂为基材的电路板被加热的时间不能超过 5min，烙铁的温度更高时，就应该相应地减少加热时间，温度越高，板子被破坏前所能承受的时间越短。

另外，热量沿着引脚传输可能会引起引脚与晶体管外壳间受热膨胀的不均匀，导致密封衬垫的破裂。通常对于手工焊接来说，推荐使用 20～25W 的焊接烙铁进行电路板的精细焊接工作，使用 100～200W 的焊接枪焊接机架和大面积的电路平面。使用正确的烙铁或焊接枪，将能很快地完成焊接任务，而且对电路板的塑料开关托架、绝缘隔层等不造成破坏或只造成很少的破坏。对于温度处于 300～400℃ 之间的焊接烙铁，其烙铁头与引脚接触的时间不应超过 5s，特别是集成电路与晶体管的焊接应尽可能的迅速、整洁。

（1）温度

进行成功焊接最重要的一步是保证在焊接前被焊部位各部分的温度大致升高到相同的水平，仅加热其中的一部分会导致出现不良焊接点。多数焊锡的熔点处于 188℃（370°F）这一温度区域，烙铁头的典型温度是 330～350℃（626～662°F）。图 13-9 表示出了焊接工作中的理想温度范围。高于此温度范围时要冒热损伤的风险，而低于此温度范围时则可能会出现冷焊接点。

（2）时间

接下来，焊接点需要用烙铁头加热一定的时间，过长的加热时间会破坏元器件甚至电路板上的铜箔，加热时间的长短有赖于烙铁的温度以及焊接点的大小。大部件需要比小部件加热更长的时间，而有些部件（半导体器件）对热很

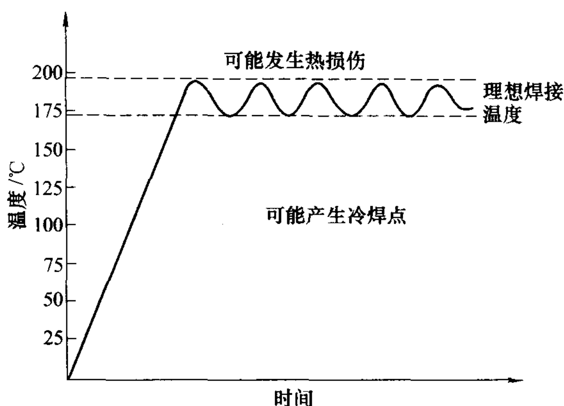


图 13-9 焊接的理想温度范围

敏感，其加热时间不应超过几秒钟，在这种情况下，应使用热分流器或散热设备来保护热敏感元器件，以防止其在焊接时被高温破坏，在焊接这类元器件的引脚时，应将其放置于或夹在能阻止热量到达该元器件的地方。

(3) 焊锡覆盖范围

为了获得良好的焊接点，使用适量的焊锡是必要的。太多的焊锡会导致不必要的浪费甚至还可能引起焊接点末端的短路，过少的焊锡则不足以形成良好的焊接点，或不能正常地支撑元器件。究竟使用多少焊锡应根据焊接的实际情况来定。

13.7 其他手工焊接工具

焊接工作台应当整洁、防止静电释放、有条理的组织以便于使用各种工具，其典型的工具包括：

1) 焊接烙铁；
2) 清洁材料；
3) 硬芯焊锡；
4) 镊钳（弯的、尖嘴的或直的）；
5) 剥线钳；
6) 引线成形工具；
7) 工具箱；
8) 烟气吸收器；
9) 包括支架的焊接台；
10) 成套的烙铁头；

11）助焊剂、海绵、锡焊编织层；
12）镊子；
13）钳类工具；
14）成套的螺钉旋具；
15）电路板固定器；
16）清洁剂和刷子。

13.7.1 钳类工具

良好的钳类工具是实施焊接前切断元器件引脚和去除绝缘外皮必不可少的工具，理论上，它应当是带有绝缘把手的侧切钳，纤细且重量轻以便于精加工，在电工应用中常使用35cm 长的钳类工具。钳类工具应由高质量的工具钢制造，以便其切割出锋利、整洁的切口；钳类工具的顶端应当是锥形的以便使用者触及卷绕电线的特殊区域；钳口应当很好的对准以便于刀口平直地接触，当刀口合在一起时甚至不允许光线穿过；其切割效果应当是平滑整洁的。

钳类工具只能用于剪切铜线和引脚而不允许清理印制电路板和金属部件的焊缝，不正确的使用很容易导致剪钳刀锋变钝。一副变钝的钳类工具比不能使用的钳类工具的危害还要大，因为它不能毫无障碍地整齐地切断引脚或剥掉金属线的绝缘皮，甚至会弄断导线束。一些钳类工具与保险夹组合在一起，这就可以收集剪断的引脚使其不会四处飞溅，使得到处都是线头。

有时用钳类工具剥去金属线的外皮是很困难的，此时可以使用剥线钳。加工不同型号的导线时剥线钳可以相应地调整填塞，填塞保证了剪切限制在绝缘皮的厚度，防止真正的金属线出现刻痕。

钳类工具专门用于剪切等于某一规定直径的导线和材料，通常是电子仪器中铜导线外的绝缘层，而不应当试图剪切大于规定尺寸的导线，以避免破坏剪切刀刃。凭经验可知，多数可以剪切直径等于1mm 的铜线而不会对其造成损伤。有各种尺寸的钳类工具可供使用，但实际上，它们只是在剪切部位有所改变而已。剪切部分必须锋利、整齐且沿刀刃没有压痕，经过一段时间的使用，钳类工具的刀刃会变钝，可将其再次打磨锋利或进行更换。有两种基本形状的剪切刀刃，如图 13-10 所示。

1）齐平的钳类工具：齐平的钳类工具用来剪切像银、金、铜等软金属线，不能用来剪切像钢丝等硬金属线。其剪切金属线的刀刃在金属线的一侧留下一个平直的外观。

2）斜嘴的钳类工具：这种钳类工具很耐用，适用于多数金属导线，它在导线端形成 V 形的切痕。

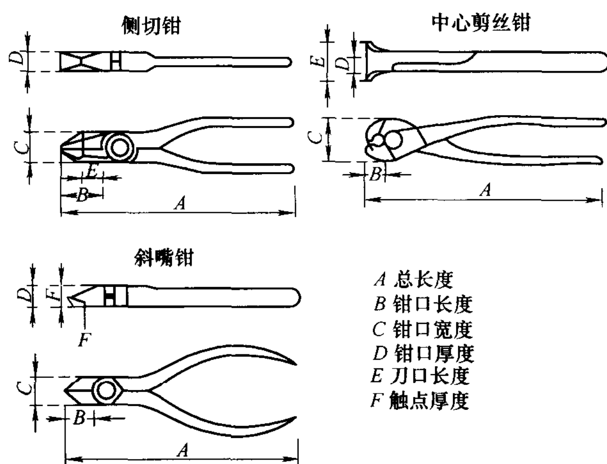


图 13-10　侧切钳

13.7.2　镊钳

在电子设备商店中最常用的一种工具就是镊钳，它常用于以下工作：包括在焊接中将导线保持在适当的位置，为保护精密的元器件而充当散热片，弯曲元器件的引脚使其适合印制电路板上的安装孔，拔出穿过制程板或机架孔的导线。

显然，单一的镊钳设计不能满足所有的需求，因此有许多不同的种类，重要的几种类型如图 13-11 所示，有些镊钳也有切刀。一副长嘴钳就足以完成大多数的工作，但手边的工具种类多一些时往往可以简化某些工作。

镊钳的手柄有不同的形状，其中最常用的是弯曲手柄，这样的设计可以提供最大的舒适度和效率，某些长嘴钳和鸭嘴钳提供延长的手柄以便可以触及更远的地方并增加杠杆作用。使用镊钳剪切导线或金属片时，谨记要戴上护目镜以保护眼睛。

在印制电路板上元器件的固定和引线成形加工中，作为手指的精密延伸，一副好的镊钳其作用是无价的。当需要将电阻或轴心引脚电容的引脚弯曲成所设计的正确程度时，镊钳将很专业地帮助人们完成这一任务，同时它还可以避免对元器件结点或引脚产生应力。通常一副尖嘴钳就可以满足大多数的应用，人们使用尖嘴细的尖嘴钳时很方便，就像使用一副结实的镊子一样，锯齿状的钳口使其在对各种导线和部件进行固定及成形时可以很好的夹紧。

两种最普通使用的镊钳是非锯齿状的圆头钳和长嘴钳。如果不正确使用，带有锯齿状钳口的镊钳由于沿着其棱边的尖点会破坏导线及其绝缘皮，故圆

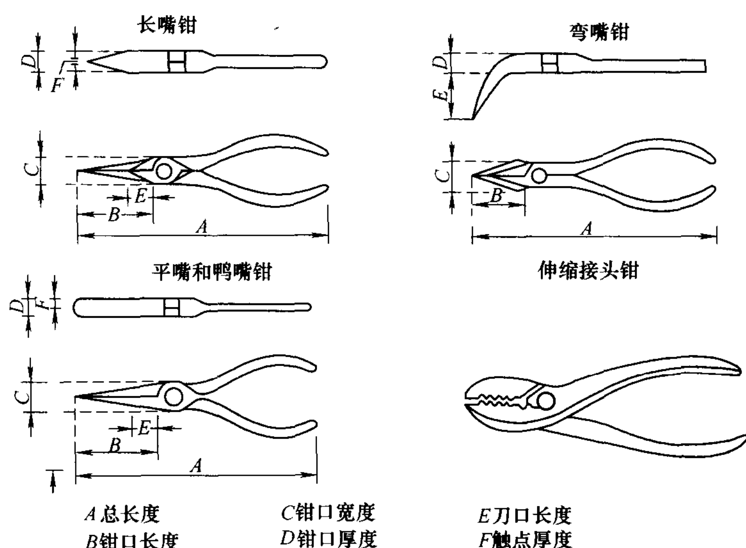


图 13-11　各种类型的镊钳

头钳在导线及元器件引脚成形时非常有用，它可以提供任何曲度的平滑弯曲。然而需要注意的是不可以将导线过度的挤压，否则会在导线中形成压痕引起破坏。

安装有可使手柄弹开的弹簧的镊钳和其他钳类工具都很便于使用，可以单手操作。

1）圆头钳：圆头钳用于导线或元器件引脚的成形，借助这一特殊的工具，可以完成任意曲率的平滑弯曲，然而需要注意的是不可以过度挤压，否则会在导线中形成压痕引起破坏。

2）长嘴钳：用于难以触及区域的装配工作。

13.7.3　剥线钳

剥线钳用于去除导线的绝缘外皮，最常用的是剪切型剥线钳，如图 13-12 所示，这种剥线钳的设计使其能够适应电器设备中常用的各种型号的导线。为防止产生刻痕损坏导线，应保证使用剪切型剥线钳时选择相应的适当尺寸的钳孔。

使用热剥线钳时，将准备剥皮的导线放在两个电极之间，当电流通过时两个电极发热，由此产生的热量熔化绝缘皮。当使用热剥线钳时，从聚氯乙烯或聚四氟乙烯等化合物中发出有毒的烟气，故必须使用一些风扇通风系统将这些气体予以适当的排除。

具有热刀刃、可旋转的工作台式剥线钳常用于需要完成导线捆扎的商店，

当使用任何一种自动剥线钳时，应当按照制造商的使用说明书调节机器，以避免在剥皮过程中产生刻痕、剪切甚至损伤导线。

采用手工剥线钳给导线剥皮时应遵守以下规则：

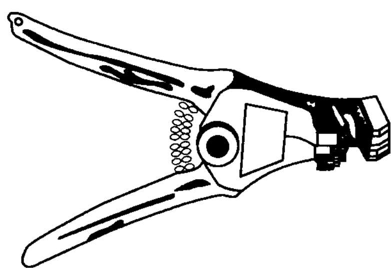


图 13-12　剥皮钳

1）将导线插入用于剥离该种尺寸导线的剪切槽中央，对应的导线尺寸通常标于手工剥线钳每一个剥线槽切口的下方。将导线插入正确的剥线槽以后，共同尽最大可能闭合手柄。

2）慢慢地减小手柄上的压力以便使剪切刀刃不接触被剥皮的导体，在某些手工剥线钳的剪切口上有一个保险机栓，可以防止刀刃接触被剥皮的导体。

3）继续释放压力直到钳口松开已经剥皮的导线为止，然后将导线完全移开。

谨记不要使导线产生刻痕，即使导线没有断裂，剪切也会减少它的直径，减弱它的导电能力，这很危险并有可能导致电气故障。

13.7.4　弯曲工具

弯曲工具是一种有平滑弯曲表面的镊钳，它对元器件不产生损伤。

13.7.5　散热

有些元器件例如半导体器件、仪表的机械装置以及绝缘材料是高度热敏感的，在焊接过程中必须保护其免受热量的损伤。像鳄口钳、长嘴钳、可用夹子夹住的商用散热片、毡头含水镊子、抗芯吸镊子等类似的设备都可以夹住或放置于焊接点处，以阻止焊接的热量到达元器件本身（见图 13-13）。

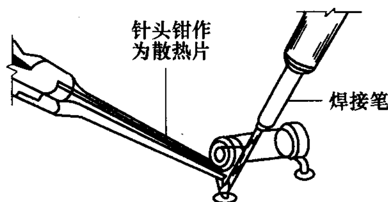


图 13-13　焊接中镊钳作为散热片使用

13.7.6　通用清洁工具

在焊接工作开始实施以前，印制电路板的表面或元器件的引脚必须作适当的清理，最常用的通用清洁工具和设备是酒精分涂器、驼毛刷、小线刷、合成鬃毛刷、清洁绵纸、铅笔橡皮擦（见图 13-14）、打印型字体擦除器、焊锡引导金属编线工具、带有托架的海绵、镊子以及单纹锉刀。

一种非常有用的焊接辅助工具是一根塑料棒或木头棒，其一端是金属尖头，另一端是金属凹槽。该辅助工具有钝的金属尖头的一端既可以用于清除印制电路板小洞中的焊锡，也可以用于去除焊锡上的突起，有凹槽的一端用来作元器件引脚的直角弯头，焊接的时候控制导线和引脚，脱锡时使引脚离开印制电路板或接线片。

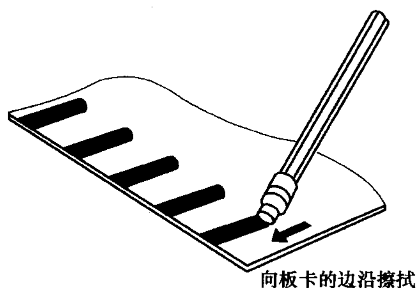


图 13-14　使用铅笔橡皮擦作为清洁工具

13.8　手工焊接

尽管由于经济的原因，批量焊接技术很受欢迎，但手工焊接仍然具有很大的实用性。在中小规模的生产设备中，手工焊接很实用，另外，如果焊接点有缺陷需要重新加工、修理或修改，也需要借助于手工焊接。对于从事手工焊接的操作员以及在顾客指定的地点从事修理工作的现场服务技术人员来讲，焊接技巧是最基本的。

13.8.1　手工焊接的必需条件

手工焊接中最重要的必需条件除了训练有素的操作员、能防止静电放电的、整洁的工作台外，就要属一把高质量的温度可控制的烙铁了，还包括正确接地的，合适、干净、良好的烙铁头。

制造优良的焊接点是一个需要技巧的工作，这需要合适的工具、高质量的清洁度以及能控制静电放电的车间。

只有在清洁的环境中才可以获得高质量的焊接点，电路板、元器件引脚以及焊接工具在焊接工作前后都必须仔细地清洗。另外，要获得可复验的高质量的焊接点，必须控制好以下两个主要的参量，它们是：

1）温度：被焊接的金属和焊锡需要的加热温度范围是 215 ~ 250℃，设定的温度取决于所使用的焊接设备以及烙铁头的形状，大约还要高出 50℃。

2）加热的时间：加热的最小和最大时间限制范围在 2 ~ 4s 之间。

焊接的温度必须恰当以利于助焊剂有活性，并且去除所有残留的氧化物并敷上一层保护膜，烙铁的热源不仅可以熔化焊锡，而且还可以使树脂和助焊剂溶液沸腾挥发，这样会导致被焊接的金属不能良好的沾锡，焊锡不能充满金属间的空隙。

焊接过程中，锡与铜形成分子间键，这种分子间键的厚度至少应当达到

0.5μm 且不能超过 1μm。焊接的温度不能过高，焊接时间也不能过长，否则分子间键的厚度将会超过 1μm 而导致焊接点的机械强度恶化，焊接温度超过 300℃时焊接点的机械强度会迅速恶化。另外，所有被焊接的元器件都有一个最高温度/时间曲线，焊接时过高的温度或较低的温度加热太长的时间都会损坏元器件，导致印制电路板的印制线或焊垫翘起、板子上的绿漆起泡，甚至电子元器件的晶体管外壳密封衬垫会破裂，致使漏电流增加、陶瓷元器件温度激增等。

13.8.2 手工焊接的步骤

工作台及其周围的地方应当保持干净、照明良好、整洁，任何的污物、油脂、焊锡的泼溅、绝缘皮的剪切以及其他的碎片都应清理干净。在电子设备组装焊接的过程中，助焊剂通常用来增强沾锡能力，焊接后助焊剂在板子上的残留可能会腐蚀电路板，引起漏电，所以在焊接操作完成后，为了系统长期稳定的工作，建议彻底地清除助焊剂。焊接处已经完工的焊接点应当有光滑、闪亮的表面。焊接点的强度依赖于沾锡的质量而不是使用焊锡的多少，过量的焊锡仅仅意味着重量和耗材的增加（Daniels，1991）。

手工焊接中最重要的因素是从事焊接工作的人，承诺以正确的方法做这项工作是焊接的第一步。

13.8.2.1 通孔引脚元器件手工焊接的步骤

良好的焊接技巧必须保证：

1）焊锡形成坚固的焊接点。

2）焊锡应当覆盖焊接点中所有的元器件。

3）焊接点中元器件引脚的轮廓应当清晰。

4）凝固的焊接点应当看起来光亮且表面无白点。

为了更好的满足上述需求，应做到以下几点：

1）根据特定的需求（传递到被焊接部件的热量不仅与烙铁头的温度有关，还与烙铁头与焊接部件之间接触面积的大小有关）。选择合适的烙铁头（形状和尺寸），螺钉旋具状的烙铁头的尺寸应当与印制电路板焊垫的直径大体相当。没有最理想的烙铁头温度，因为这有赖于以下几个参数，如烙铁的种类、所焊接物体的尺寸、烙铁头与被焊接部件接触面积的大小。使用圆锥形的烙铁头可以向小的区域传递热量，这类烙铁头用于所需焊锡较少的小的焊垫及元器件，螺钉旋具状的烙铁头或凿状的烙铁头传递的热量要多，因为其烙铁头与被焊接部件的接触面积较大。

2）清洁所有元器件的接线端及衬底。

3）拿起烙铁用湿海绵擦拭热的烙铁头两到三次，这可以去除污染物和氧化物，但不应使烙铁头冷却太多。在烙铁头上涂一些硬芯焊锡，对于新烙铁头来

讲镀锡特别重要。

4）在将要被焊接的部位涂上助焊剂。

5）为将要焊接的区域预先镀锡。

6）将元器件的引脚弯曲，修剪成适当的长度，为焊接做准备。在焊接前将元器件的引脚剪切到适当的长度是明智的，以防止装配后剪切过长的引脚损坏元器件。

7）插入元器件。

8）选择正确的焊锡丝，建议选用的焊锡丝直径略小于被焊接焊垫尺寸的一半。使用过细的焊锡丝进行大部位的焊接时，要熔化足量的焊锡需要耗费太长的时间（此时需要牢记的是加热 3s 过后损坏元器件和电路板的风险非常高）。使用过粗的焊锡丝焊接很小的焊接点，会造成对焊锡量失去控制从而导致焊接以失败而告终。

9）电烙铁头应尽可能多的接触焊接点，焊接时使烙铁与板面成 45°。

10）将焊锡丝靠近烙铁头使其熔化在连接点和烙铁头附近流动。

11）移开烙铁头，使焊锡流进烙铁头刚刚移走的位置，连接点上所有的元素都应当被焊锡所覆盖。

12）当焊锡成功的流进引脚和印制线处以后，将焊锡移走，再拿走烙铁。许多人错误的首先移开烙铁，这样做常常会导致干焊接点的发生，因为焊锡会从焊接点接连处不断地吸收热量。

13）如果有一些独特的元器件特别是对热量敏感的元器件，焊接时应当使用散热片或热分路器帮助吸收热量，热分路器应当紧贴引脚靠近焊垫的部位以防止过多的热量损坏热敏感元器件。

14）首先移开焊锡丝，再移走烙铁，完成一个手工焊接点的平均时间为 3s，如果耗费过多的时间，可能引起对板子和元器件的热破坏。

15）在焊锡凝固的过程中，印制电路板和元器件不应当有任何的移动。

16）检查焊接点。典型的良好沾锡的焊接点会逐渐减弱至平滑边缘，焊锡不能像球一样在金属的上方结成一块，所有被焊接的金属应被焊锡所覆盖，在焊接点处引脚的轮廓应该是可见的。对焊接点再次加热常常需要使用额外的助焊剂。

17）再次用湿海绵擦拭烙铁头，用硬芯焊锡涂在烙铁头上使其镀锡，当几分钟或更长时间不使用烙铁时应在烙铁头上熔化一些焊锡，烙铁头的焊锡层可以阻止氧气与烙铁头的金属接触，保护使其不被严重氧化。更长的时间内不使用烙铁时，也可以将烙铁的电源关闭。

18）清洗焊接点。手工焊接操作结束后应立即进行清洗操作，如果不立刻进行清洗，焊接点上助焊剂的残留物将会变硬，去除它将会变得越来越困难。

13.8.2.2　SMD的手工焊接步骤

热传导和热对流技术常用于SMD的手工焊接，手工焊接中采用通常的热传导方法、使用特殊的烙铁头也可以用来替换多端的SMD。热传导焊接的优点是其烙铁可以很容易的运送到远方场所进行现场修理，但它需要为各种部件配备许多成套的焊接工具，还需要很高的操作技巧。焊接的步骤除了需要将干净的焊锡非常平整地涂到每一个焊垫上，采用夹钳或涂于元器件下面的环氧胶水将元器件放置到正确的位置上之外，其他方面与穿孔引脚元器件的焊接方法相似。

热对流技术使用热风提供一种更加受控的焊接，热的空气直接由喷嘴吹到SMD的焊锡接线端上，具体过程由各自的元器件提供商给出特别的说明，其通用的焊接步骤如下所述：

1）选择适当尺寸的真空喷嘴将元器件固定在合适的位置。

2）选择合适形状和尺寸的喷嘴以便施加热风。

3）设置适当的温度。

4）为刚刚清洁并镀锡的焊垫区域用给料器涂焊锡膏。

5）预加热电路板保护板子上的元器件，防止过度加热。

6）将印制电路板放置在合适的固定夹具中。

7）依靠真空吸嘴使元器件保持在适当的位置。

8）放置元器件。

9）利用放大镜或显微镜检查元器件是否对准。

10）设置所需的加热时间。

11）采用热风重熔焊锡膏（使用所需要的最短时间）。

12）确保焊接点凝固的过程中不要移动印制电路板和元器件。

13）清洗并检查焊接点。

13.8.3　无引脚电容的焊接

某些设备中使用没有引脚的电容，将这类电容成功焊接到印制电路板上需要特殊的技术。当焊接没有引脚的电容时，采用下述步骤可以将出现问题的可能性减到最小（见图13-15）。

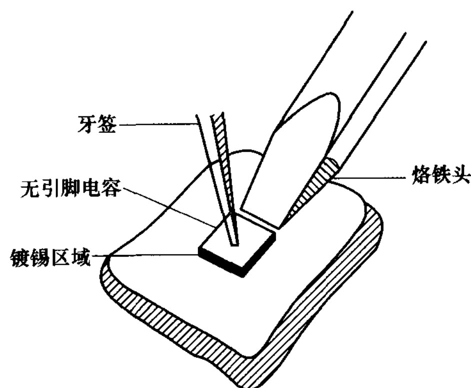


图13-15　焊接无引脚元件的特殊技巧

1）采用小烙铁使用较低的温度对电容进行镀锡，镀锡时用一枚银币压着电容的边缘使其沉下。

2）给印制电路板将要贴装电容的地方镀锡。

3）将电容放在印制电路板的理想位置上。

4）对板子靠近电容的地方进行加热，注意不要紧贴电容，更不要在电容顶部加热来进行焊接，因为这样做会永久地损坏电容。

5）用一根牙签或小木棍轻轻地压下电容，直到它稳定在板子上，这表示它下面的焊锡已经熔化，然后移走烙铁使其冷却。

13.9 印制电路板的装配过程

传统的印制电路板装配方法是将元器件的引脚穿过通孔并与电路板相连，将元器件与板子连接在一起的焊锡同时提供电气连接和机械连接。随着微电子技术的发展，超大规模集成电路芯片封装在很小的引脚间距上有大量的焊接点，进而出现了表面贴装技术。但不是所有的元器件都适合制成表面贴装的形式，因此，印制电路板现在仍为混合元器件贴装技术，即引脚贴装与表面贴装同时存在。

印制电路板的装配既可以是手工的也可以是使用机器进行快速可靠自动装配的，由于印制电路板的最终装配包括各种配置的大量不同类型的元器件，组装过程需要仔细地选择，以保证经济而且可靠。

典型的印制电路板其上贴装着许多双列直插封装器件、电阻、电容、电感及连接器等，所有这些元器件都需要在电路板上预留通孔，以便装配时将其引脚插入。大体上，装配的过程包括以下几步：

1）按照材料单上所给出的规格收集元器件；

2）准备元器件及元器件的成形（在贴装前进行引脚的剪切和弯曲）；

3）清洁印制电路板，可用商用清洁工具刷或用清水等清洗；

4）检查板子和元器件的尺寸；

5）将元器件放置到装配线上各自的托架中；

6）插入元器件；

7）采用手工焊接或批量焊接机器焊接元器件的引脚；

8）清洁并取出多余的助焊剂；

9）贴装质量较重的或不能经受焊接的高温及清洗的特殊元器件；

10）检查测试；

11）焊接点整修；

12）喷涂护形涂层；

13）入库。

以上流程顺序只是例证性的，不是所有的装配线都必须遵守，根据元器件

种类的不同可能会有或多或少的改变，可能采用手工操作，也可能使用一些特殊的设备。

13.9.1 通孔引脚的装配

13.9.1.1 手工组装

手工组装通常以一个批次为基础进行小批量的生产或样机制作，上述的大多数工序是手工操作的。板子上的通孔用来贴装元器件、完成电气连接并达到一定的机械强度。为了保证可靠的工作，通孔的尺寸必须与元器件引脚的直径相匹配，同样，焊垫也必须有合适的尺寸。为了使板子获得良好的机械强度，轴心引脚的元器件和放射状引脚的元器件其引脚都插在通孔中，引脚的长度应当进行适当地剪切再进行焊接。这种情况下，所有的元器件在贴装到印制电路板之前需要进行预先成形，该操作可以手工进行也可以通过模具或夹具来完成。若用手工方法进行，元器件的预先成形可以使用钳子、手工剪或用于弯曲的工具；若需要装配的印制电路板的数量很大时可利用模具或夹具。一旦元器件形成所需要的形状和尺寸，就可以插入通孔进行装配了。

手工装配首选的方法是有一个带有许多用来盛装元器件的小仓的可以旋转的圆桌，已经完成预先成形的元器件就放在每一个小仓里，装配工坐在旋转的桌子旁，将小仓转到合适的位置，从中拾取元器件将其贴装到印制电路板的相应位置上。

当元器件的引脚必须被扭弯时，可将组装板放置在一个特殊的固定装置上，该装置包括一个框架，其上有被金属板支撑的厚泡沫材料，组装板就固定在这个可以旋转的框架上。通过旋转组装板，元器件的引脚就转到了装配者面前，可以用一副钳子很容易地将其扭弯，操作时用钳子捏住引脚准备剪切或弯曲的位置即可。操作时由印制电路板的左下角向板子的右上角逐一进行。

为了帮助操作者正确无误地插入元器件，应使用由计算机控制的光定位系统。不同的元器件放置在不同的小仓中，当需要插接某一特定小仓中的元器件时，该小仓转到操作者前面，小仓上方的活门打开，一个光点出现在电路板上该元器件将要插入的位置。如果需要再次使用同一类元器件，小仓上面的活门仍旧保持打开状态，电路板上的光点移到一个新的位置。对于有极性的元器件，光点在元器件插入的位置来回移动并指示出特定的极性。训练有素的操作者可以使用双手非常迅速地进行装配操作。

电路板上所有元器件的长引脚插入通孔以后，将框架中的电路板拿到电动剪切机上，剪切机将元器件引脚剪切到适当的长度并固定在相应的焊接点上。接下来插入另外一些有适当长度引脚的元器件，例如半导体器件、继电器、电感线圈及连接器等，一旦插好了所有的元器件，板子就可以进行波峰焊接了，

焊接时印制电路板上有一层焊接掩模，只有焊垫和印制线等需要焊接的部位暴露在外面。

当所有的元器件均定位在各自的位置上并根据需要弯曲紧固后，开始焊接前的检查。检查时使用一张透明的聚酯薄膜，其上有标明元器件位置的装配图，通过将印制电路板与透明的聚酯薄膜相对照，就可以很容易地识别并纠正缺失和移位的元器件了。

1．清洗

在元器件的引脚、导线和接线端焊接到电路板上之前，需要用一些编织物状的清洁工具对其进行清洗，然后再用蘸有酒精的硬鬃毛刷清洁电路板表面，然后用纸或不含棉的抹布将其擦干。

需要注意的是焊接不适用于不清洁的部件，故焊接前应当去除油、氧化物及其他污染物。人们都知道旧的元器件或铜板由于其引脚及表面有一层氧化物而很难被焊接，熔化的焊锡与氧化物层相排斥，焊锡会形成小球状，滚到不希望其出现的地方。所以应当用便携式的小挫或细砂纸擦拭旧电阻与电容的引脚，用研磨橡皮块或橡皮擦清洁印制电路板的铜焊接点，以便露出下面新的金属。

2．元器件成形

为了使元器件更好的适应电路板，将其安装在上面时需要将元器件正确成形，如图 13-16 所示。元器件成形有两个主要的作用：

1）以便引脚牢牢固定在电路板上；

2）提供正确的应力释放。应力释放是必要的，它可以防止元器件的引脚与元器件裂开，防止导线、焊接点与导线束产生持续的拉力而破裂。

可以采取以下步骤来正确地弯曲元器件的引脚：

1）引脚弯曲点距离元器件体不应小于 3 ~ 5mm；

2）引脚弯曲处的半径应等于引脚引线厚度的两倍；

3）使元器件体位于其两个焊接点的中间；

4）引脚插入电路板以后借助弯曲工具将伸出的引脚弯曲 45°。

5）剪切引脚以使其弯曲后没有超出焊垫的环形区域部分，并将剪好的引脚紧紧地压在焊垫上；

6）在焊接点上，当引脚不进行弯曲时，按照 SWG20 规定的长度剪切引脚。

对于集成电路来讲，引脚成型是不必要的，可不必切其引脚而直接将其焊接到板子上。

引脚弯曲是元器件成形中最重要的一个因素，引脚几次强烈的来回弯折很容易就会导致其折断或破损。引脚的弯折点太靠近元器件的封装可能导致在引脚入口处受力过大，引起封装体破裂，这种破裂致使湿气进入元器件内部，使

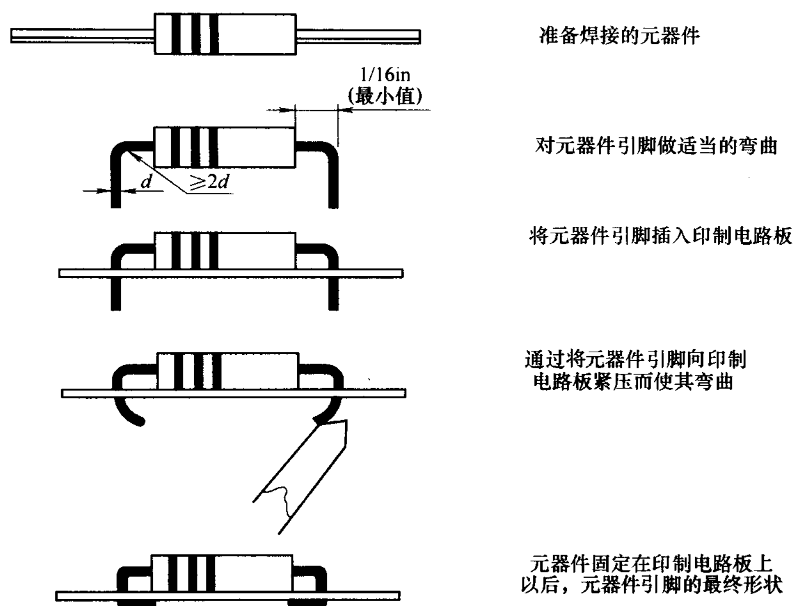


图 13-16 焊接元器件引脚成形

元器件逐渐地恶化，从而导致过早的被破坏。

3. 电路板

尽管通用的清洗准则也适用于电路板，但一些预防措施是必须的，这是因为电路板可能含有一些元器件，如果使用编织物状的刷子清洗则容易被弄坏。清洗印制电路板时，可使用尖锐的打字机擦除器来去除将要焊接的焊垫上的灰尘、污染物和其他外来物质，然后用毛刷和酒精清洗，等待晾干。

需要注意的是在通过焊接更换元器件的整个过程中，一个最关键的因素就是清洁，应当严格地遵守操作规则。对于不干净的表面，需要用烙铁施加更多的热量以使焊锡吸收，这常常是非常有害的，因为使污染物蒸发掉无论如何是不可能的，而元器件却可能被过度加热。对于半导体来讲，温度更是一个十分关键的因素，因为过多的热量会导致其损坏。

13.9.1.2 自动装配

自动装配技术用于大批量的生产，为此需要采用流水作业的方法，图 13-17 给出了一个引脚元器件的自动装配系统流程图。自动装配系统的第一个方案主要用来将轴心引脚元器件插入印制电路板，使用如下几种加工过程将元器件带进安装位置，例如元器件体卷带、元器件引脚卷带以及储存送料。元器件引脚卷带加工已经标准化，大多数轴心引脚元器件都可以从这种引脚卷带的形式获得，如图 13-18 所示。

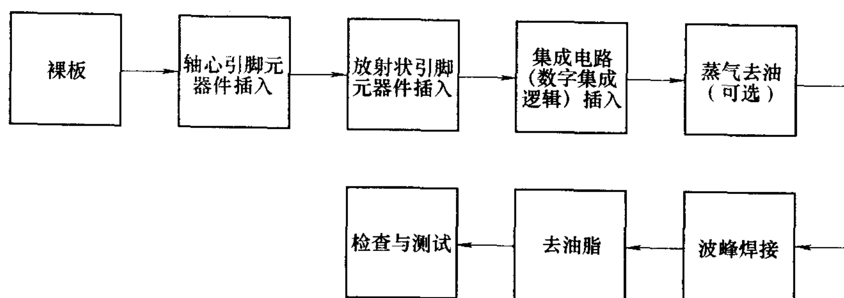


图 13-17　引脚元器件自动装配系统流程图

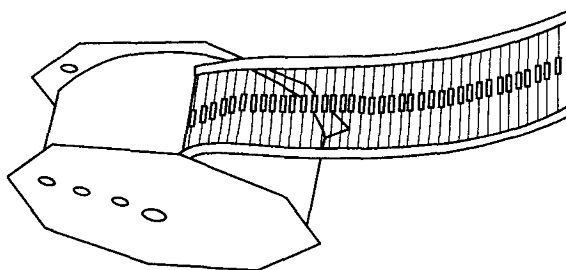


图 13-18　卷带式连载元器件引脚利用纸带连接卷绕（层间隔离器）

轴心引脚元器件早期的自动装配方案非常简单，工作台的上部单元基本上由插入装置、弯曲端头、卷带式连载元器件以及可以旋转的铁砧组成。元器件从卷带中切下后由内侧成形器和外侧成形器形成订书钉状，然后将其推向下方插入印制电路板上的通孔中，如图 13-19 所示。

在现代设备中，每一个元器件在电路板上的定位都需要使用缩放仪设备进行检查。最初使用的手工操作的缩放仪使用触针和模板，将电路板放置到适当的位置以便于元器件的插入，后来同样的人工系统升级为数控设备，随着计算机的广泛应用，人们引入了计算机数控系统（CNC），这一自动装配顺序机投入使用后，元器件封装的标准化就成为了必需。

需要使用两种类型的元器件插入设备，这两种元器件的引脚是轴向的和放射状的，它们都是缩放仪应用元器件，上述插入设备允许一块或多块电路板同时移动以使机头插入元器件。元器件必须以正确的顺序供应给插入设备，这可以通过使用排序机来完成，排序机可以接受卷带式连载零件封装的轴向引脚元器件，并按照插入的顺序将其再次安装到电路板上。作为选择，有些设备使用气流来从选择设备中移动元器件，然后将其从卷轴上依次切下后，设备发出气

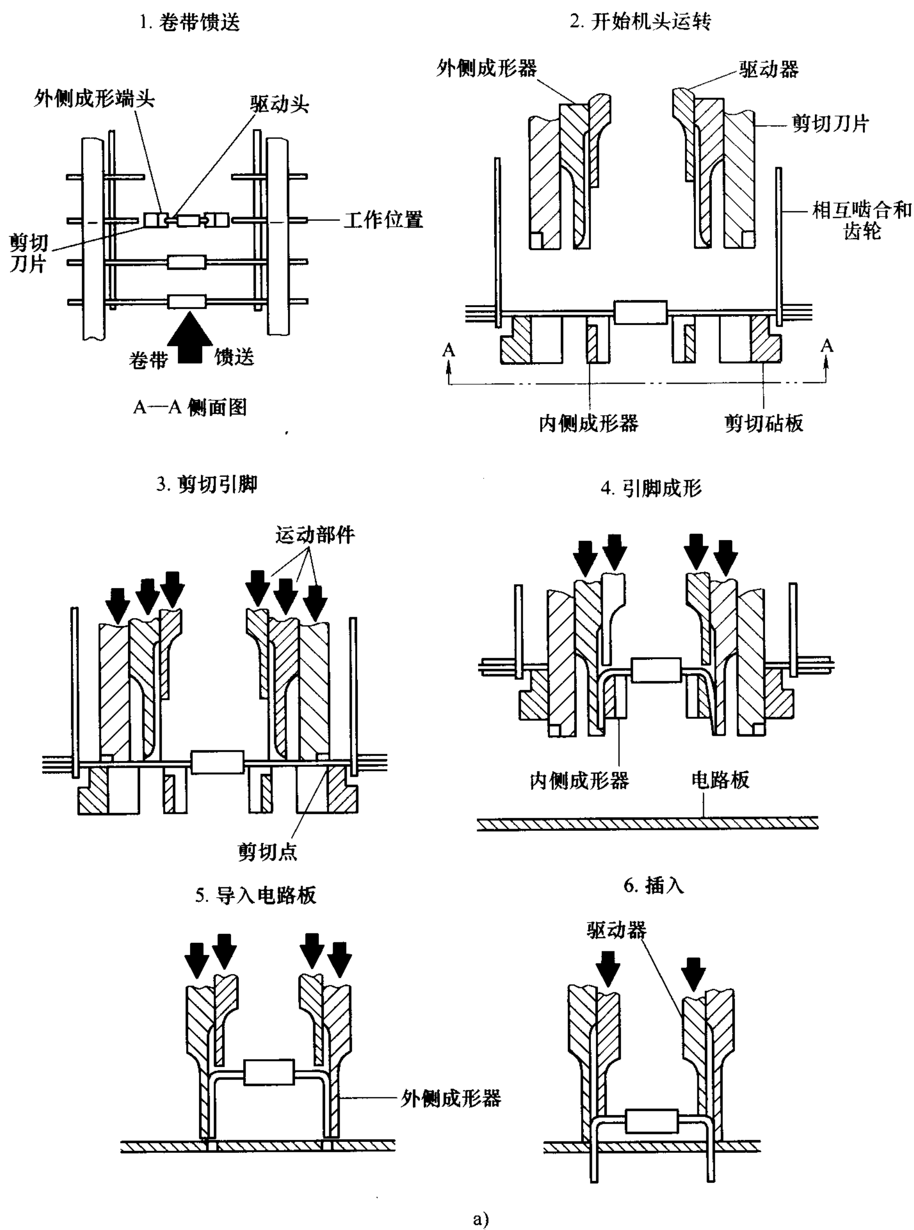


图 13-19　轴心引脚插入装置的基本功能及典型的剪切弯曲单元与剪切和弯曲之前的顶视图（NTTF 注释）

a）轴心引脚插入装置的基本功能

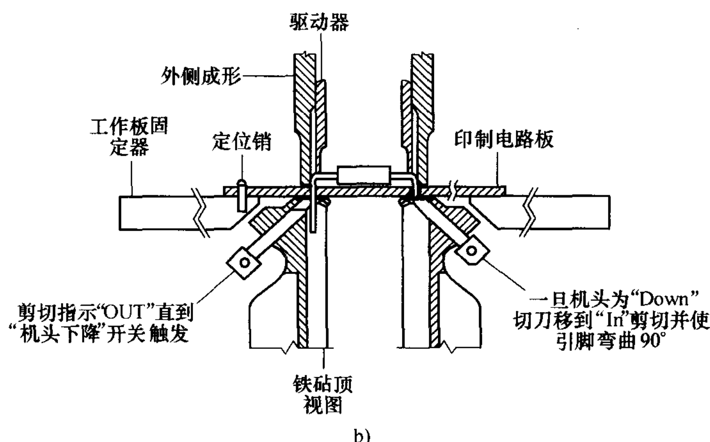


图 13-19　（续）

b）典型的剪切弯曲单元与剪切和弯曲之前的顶视图

流将元器件吹入输送管，并进行引脚剪切和成形以便于将其插入到电路板上。所有的元器件都插入电路板以后，再对其引脚进行剪切和弯曲，然后插入晶体管、集成电路和其他电子硬件元器件，对电路板使用波峰焊接并进行检查和测试。

有几个因素支配着自动组装过程，例如，必须仔细研究在组装顺序中印制电路板必须要经过的工艺顺序和所使用的自动组装设备的能力。通常，设备的提供商将会给出必要的使用信息以指导使用者设计出适合于自动组装的印制电路板。

另外，设计用于自动组装的印制电路板时，必须注意元器件引脚的直径与通孔直径之间的间隔。通常为保证可靠的插入应使该间隔尽可能的大，但同时该间隔不能大过进行良好焊接所需的最低需求。因此，进行印制电路板设计时，应当关注所有相关的设备参数。

与手工组装相比，自动插入设备有一些缺陷和限制，例如，机器不能将引脚直径为0.6mm的元器件可靠的插入到直径为0.625mm的通孔中。采用手工操作，元器件可以以任意角度插入到印制电路板上，而机器却不能。人工组装中，不同形状和尺寸的元器件都可以使用，但对于机器组装，需要对元器件的形状和尺寸进行更严格的控制。所以在设计用于自动装配次序的印制电路板时必须遵守一系列的规则，元器件插入到电路板时必须以某个特定的方向或两个相互垂直的方向，也可以选择采用转动的桌子来完成装配。

13.9.2 SMD的装配

SMD通常被认为是一种便于使用真空拾取放置尖喷嘴来进行装配的具有平坦上表面的元器件。

SMD通常可以分为：

1）芯片元件：电容和电阻。

2）半导体封装器件：其封装形式可能是晶体管或集成电路。

（1）小外形塑封晶体管（SOT）

这是一种标准的有三个引脚的塑封器件，有各种尺寸，常选用的封装形式有SOT-23、SOT-89等。

（2）小外形封装集成电路（SOIC）

与上述的小外形塑封晶体管器件相似，只不过它有更多的引脚且引脚间距更密。

（3）有引脚塑封芯片载体（PLCC）

它照顾到了不同热膨胀的引脚，有助于防止对器件的破坏。

（4）无引脚陶瓷芯片载体（LCCC）

使用陶瓷作为基材，电路的上下表面均有陶瓷包着且陶瓷在电路的边缘相互连接，将芯片完全密封在陶瓷中，集成电路芯片粘接在位于上表面的陶瓷载体上，与下表面陶瓷的末端焊垫相连接。

（5）单列直插封装（SIP）

一种特殊的封装形式，通常用于像电阻、二极管、电容或其组合等无源网络。单列直插封装形式的引脚间距通常为0.1in或0.125in（2.5mm或3.12mm），引脚的数目通常为2～8，有时会更多些。

由于这里所涉及的元器件均为SMD，所以这类元器件采用自动装配的方法要容易的多。此时的电路板上只有一些提供层间连接的层间导通孔，而没有供安装元器件的通孔。

13.9.2.1 手工装配

图13-20给出了一个简化的SMD手工装配流程图。第一步是将焊锡膏涂在裸板上，焊锡膏的涂敷可采用气动式分发或丝网印制，在手工装配中常用第一种方法。将已知量的焊锡膏放入注射器中，注射器的针头置于焊垫上，用手柄控制注射器底部进行推动，直到每一个焊垫上均涂有所需剂量的焊锡膏为止。

接下来采用真空拾取笔手工安装元器件，操作者拾取正确的元器件将其以正确的方位安装到电路板上，但定位有大量引脚的集成电路通常是十分困难的，为此，可以采用人工操作的拾取放置设备，它采用真空系统来控制可能用到的

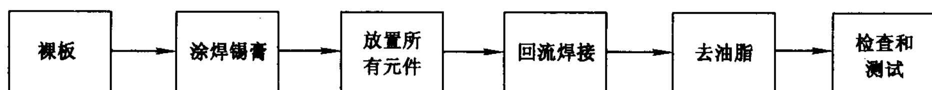


图 13-20　SMD 手工装配流程图

元器件，元器件可以通过多种不同的方式馈送到该设备中。无源元器件和小的半导体器件通过卷带馈送，而集成电路通过不同宽度的硬塑料芯片存储盒馈送。

元器件组装好以后，采用红外线或气相炉对其进行回流焊接，然后对组装板去油脂以去除所有的助焊剂并进行检测。

13.9.2.2　自动装配

SMD 自动装配与手工装配的步骤相同，只不过所有的操作都是自动进行的（Alan Roads，1991）。在印制电路板上装配 SMD 所采用的方法与所选用的焊接方法有关，一旦元器件固定在正确的位置上，就采用波峰焊接或回流焊接。如果选择波峰焊接，元器件必须用粘结剂固定在适当的位置上；如果选择回流焊接，可用焊锡膏来完成这一功能（Buckley，1990a）。下面两节将详细介绍焊锡膏和粘结剂。

焊锡膏施加到焊垫上以后，将电路板移到元器件自动安放设备上，它可以自动地将元器件安放到涂有焊锡膏的焊垫上。SMD 的一个主要优点是通过消除元器件安放过程中及之前的许多活动而简化了安放过程，例如不再需要元器件引脚的弯曲、成型和剪断。

元器件成批的利用塑料管或卷带式连载零件的格式递送给自动安装设备，计算机控制的拾取放置系统将元器件从包装中移出，并将其以正确的位置和方向安放在电路板上，元器件安放的位置其精确度误差不能超过 100μm。用于拾取放置设备的大多数元器件放置在各种型号的卷带上，因此，更换卷带的时候应当特别小心，因为多数元器件具有相同的外形和相似的部件号，使用时必须对照文件清单进行仔细的检查。元器件进料器可以通过气压、机械作用或电来驱动。

元器件放置机头可以使用真空或机械拾取工具，考虑到速度和准确度的因素，大多数拾取放置设备都采用真空工具来拾取元器件，然后将其放置到印制电路板上，当然，也可以使用机械夹钳。有些设备对这两种技术都有采用，使用真空工具将元器件放置在电路板上，使用机械夹钳将元器件置于焊垫的中心。

自动装配大致上可以分为两类：顺序装配和同时装配。顺序装配即将元器件一个接一个的拾取并放置在印制电路板上（拾取放置方法）。同时装配是将所有的元器件在一次操作中同时放置到板子上，其应用效率很高。顺序装配设备

每次放置一个元器件，在没有操作者干涉的情况下，从陶瓷制电容到大型集成电路其速度为每小时1000~2000个不等。标准的拾取放置设备可安放60~120种不同的元器件，高性能的拾取放置设备可以安放120~400种元器件。

同时装配采用的设备具有多个机头，它一次可以在电路板上放置两个或更多个元器件。当吸嘴放置元器件时，一束红外线会触发照相机为将要安放的元器件拍照，该照片与存储在计算机中的照片进行比较，由计算机来确定元器件的引脚是否歪斜或弯曲，元器件是否放置到了电路板的适当位置上，如果元器件型号不对，方向或引脚有问题，在吸嘴将元器件放置到电路板上之前将会把它丢弃，设备也会自动停止工作。在组装板开始进入回流焊接操作之前，元器件在电路板上的正确放置非常重要。

高性能的同时装配系统的拾取放置速率可达到每小时15000~200000个元器件，此类系统适用于有高产量需求的公司，例如商用产品的制造商。

顺序装配和同时装配两种方法也可以结合使用。尽管同时装配设备性能高，安放每个元器件的成本也低，但有许多其他因素使得顺序装配也是可取的，另外一些工作中，同时装配设备用于大量生产，顺序装配设备用于小量和中等产量的生产。

随着灵活自动拾取放置系统进入实用阶段，用于自动控制的新的小型和中型的制造工具开始出现，它们在元器件处理和资本费用方面都很实用。

设备的放置性能数据通常在制造商的工作手册中都有规定，它给出了在印制电路板以及所选元器件和送料类型给定情况下元器件的最大放置速率。实际应用中，元器件放置性能有时会小于理论值的一半，这些性能资源的损失主要是设备的故障停机阶段、设备的装配时间以及与印制电路板和元器件相关的性能降低。

对于自动放置设备来讲元器件放置的精度是一个重要的质量参数，其关键参数是元器件放置的可靠性。为获得高水平的元器件放置可靠性，特别是对于当今的多引脚数目元器件，印制电路板和元器件都需要使用光电测量系统。

采用顺序拾取放置系统通常可以获得的差错率小于20dpm，20dpm意味着每1000000个元器件有20个发生故障。为了获得和维持较低的差错率，需要对设备所有方面的工作进行监视和控制。

例如，使用安装在放置机头上的分离控制的夹钳对，元器件在真空吸嘴上时就可以将其排列好并使其处于中心位置，在元器件进行 x 轴和 y 轴调整时，元器件可以旋转到与组装位置一致的正确的方向，其角度分辨率可达0.1°。元器件到达放置位置以后，夹钳对打开，真空吸嘴上的元器件降低，设备采用计算机编程控制安放力量的大小进行元器件的放置。

在进行一次成功组装过程中元器件安放设备扮演着重要角色，Hodson

(1993a) 讲解了购买一套拾取放置设备时必须考虑的几个重要参数，这些参数包括：所需的吞吐量、所需的精确度、元器件类型和装配技术容易综合、操作的复杂性、支持计算机辅助设计（CAD）软件的下载、Gerber 档案的兼容性、加料器的数目和风格、其他可用的选项（视觉系统、在线测试、粘结剂分发器、元器件排列系统等）、技术升级的简易性、安全性、耐用性以及成本。Rhodes (1991) 描述了紧密引脚距 SMD 的发展趋势以及规定元器件放置设备精度和配置的各个参数。

对于特殊的生产应用，印制电路板的组装常常使用芯片投射器。芯片投射器是一种芯片元器件放置设备，它能够以很高的速度进行操作，将元器件从部件馈送器中移出，并确保它是所需的适当部件，并且在将其放置到印制电路板上之前进行精确的方向调整。这种设备所使用的主要芯片元件是无引脚的陶瓷电容和电阻。芯片投射器不用于大型元器件，因为这会导致总吞吐量下降。部件越复杂，图像识别、θ 校正、部件放置等所耗费的时间就越多（Crum, 1993）。

元器件拾取放置设备和芯片投射器最主要的不同在于它们放置元器件的类型和操作的速度不同，多数芯片投射器放置小型的无源元器件（电阻和电容等），而拾取放置设备放置具有许多细密引脚的大型封装元器件。

两个夹钳对中的一个是电气绝缘的，它可以进行电气性能测试。电阻、电容、二极管和电感线圈的测量值与可以允许的标称值进行比较，如果它们没有落在可以耐受的制定范围中，则该元器件被丢弃。

Smith (1993) 描述了用于清洗表面贴装组装板和组装后的清洗设备和系统，带有 SMD 的电路板的焊接后清洗采用 Polhamus (1991) 描述的超声清洗非常有效。

13.9.3 混合技术组合

在混合组装板中，有以下几种情况，如图 13-21 所示。

1) 单面板：混合元器件位于板子的同一面。

2) 双面板：引脚元器件位于一面，SMD 位于另一面。

3) 双面混装板：混合元器件位于一面，SMD 位于另一面。

根据这些类型，就可以相应的进行组装了。

13.9.3.1 混合装配 SMD：单面

正面含有引脚元器件，背面含有 SMD 的混合装配单面板，其装配流程图如图 13-22 所示。

13.9.3.2 混合装配

两面都有 SMD，引脚元器件位于一面。

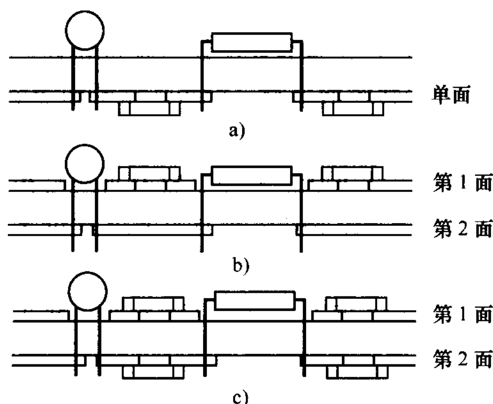


图 13-21 各种混合技术的组合
（经 Haskard 同意，1977）
a）带有混合元器件的单面板 b）装有引脚元器件的双面板 c）一面安装混和元器件，另一面为 SMD

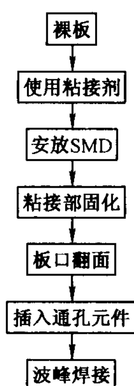


图 13-22 采用混合技术组装带有 SMD 和通孔元器件的单面板的过程步骤

双面 SMD 加上单面引脚元器件的电路板组装程序包括以下两个步骤：

1）电路板正面进行焊锡膏的丝网印制，插入引脚元器件。

2）对电路板的另一面使用粘结剂，放置 SMD，待粘结剂固化后再次将电路板翻面，进行助焊剂涂敷和波峰焊接，其流程如图 13-23 所示。

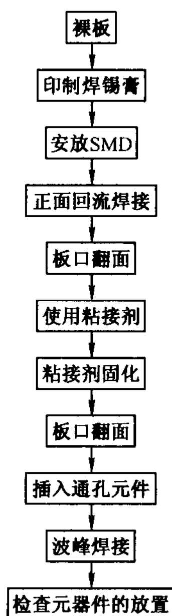


图 13-23 采用混合技术组装双面板的过程步骤

注：SMD 位于板子的两面，引脚元器件安放于板子的一面。

在电路板组装过程中包括一系列的机械（焊锡的模板印制以及 SMD 的放置）和冶金（焊锡熔化）方面的操作。对于元器件来讲可能会发生排列不整齐以及工艺完成时元器件缺失，因此，某些形式的自动检测系统对于提高质量和产量是非常重要的。

经常使用两类系统来进行元器件放置的自动检测：

1）基于照相机的系统；

2）基于激光的系统。

（1）基于照相机的系统

该系统或使用灰度等级或使用彩色电荷耦合器件（CCD）照相机，利用照相机获取电路

板的图像，然后对这些图像进行分析来决定在所检测的电路板区域内是否有缺陷和不正常的地方。该系统有赖于电路板光反射的亮度，对亮度条件和材料的改变很敏感，因此，它更适宜采用可编程的照明器材来生成元器件和元器件所在处的最佳图像。然而，由于图像越来越复杂，需要对图像的处理耗费大量的时间，检测周期时间有了显著的下降。

（2）基于激光的系统

该系统利用激光扫描仪来产生电路板的 3D 图像，该 3D 图像基于电路板表面及其元器件的高度，它对于元器件颜色改变的敏感程度要小得多。该系统也能够生成 2D 灰度等级图像，可用于鉴别高度对比很小的物体，例如板基准和检测焊锡膏中的元器件引脚。激光扫描能够对元器件进行准确地测量和定位，其误差很小。

上面提到的几个系统可归类于自动光学检测系统（AOI），这类系统至少应该能够沿着每一个元器件的 x 轴、y 轴和 θ 维来测量元器件的位置，还应该能够检查元器件的极性是否正确。通常将元器件的实际位置与计算机辅助设计的数据进行比较以确定元器件的位置误差是否在允许的范围内。将位置误差超出允许范围的元器件识别出来，该测量用于升级统计过程控制表。良好的自动光学检测系统应当是最小错误识别系统，包括将位置良好的元器件识别成缺陷元器件以及将有位置缺陷的元器件误认为是正常的元器件。

减少产品的市场更新换代时间、开发成本和生产成本是一个不断增加的需求，为满足上述要求，最好将为制造和组装着想的设计（DFM/A）与产品的生产框架一体化（Holden 和 Kenyon，1994）。DFM/A 在本质上着眼于几个分离的领域，例如印制电路设计和布局的最优化、印制电路基材耗费的最小化、组装成本的最小化、使用首选的部件以及测试范围的分析。Boothroyd（1990）阐述了在产品的设计阶段就考虑到产品的组装可以提高产品的可靠性，他提倡在设计阶段就考虑到组装这一设计思想，建议在设计阶段本身就对制造阶段可能出现的问题进行前瞻性考虑。

13.10　用于 SMD 的焊锡膏

焊锡糊剂常常被称为焊锡膏，用于 SMD 的“回流焊接”，在该加工过程中焊锡的施加和加热是两个分离的步骤。焊锡膏主要由粉末状的焊锡和助焊剂以及一些必要的添加剂制造而成，使用这种焊锡膏后可以获得令人满意的效果。

焊锡膏的应用既可以使用模板印制的方法也可以使用丝网印制的方法，拾取放置的吞吐量是决定使用哪种焊锡膏分配系统的重要因素。Erdmann（1991）

阐述了模板印制技术，包括了模板的发展、模板的清洁以及印制等，他指出对模板印制的需求比普通的表面贴装技术丝网印制的要求要严格得多，要求模板更应维持接近完美的对准度。

大型拾取放置系统需要的容量只有丝网印制设备可以提供，这类拾取放置设备的吞吐量范围是每小时1500～3000个元器件，它很适合于目前的分发设备，在典型的制造环境中每小时可以完成16000点的分发。（Cavallaro和Marchitto，1991）

一个转动的容积式可编程泵如图13-24所示，它可以有效地用来进行焊锡膏的分发，包括含有大量很小焊接点的高速分发。它由一个直流电动机驱动，具有一个电子离合器来抓紧或释放阿基米德螺钉钻子，螺钉钻子的上方固定着一个波纹管以及与其成一条线的离合装置和导螺杆，它们减少了z轴传感器冲击的60%。恒定的电动机速度、低气压、软件控制的离合装置、精确选装的阿基米德螺钉钻子这一系列组合保证了这一分发系统要比脉冲空气系统和活塞分发系统有效得多（Cavallaro，1994）。

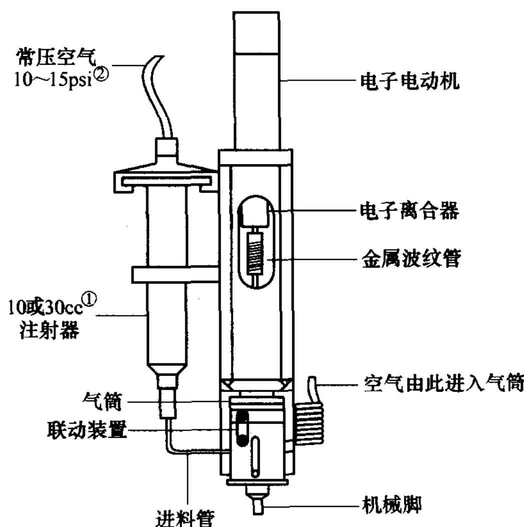


图13-24 双重高度旋转容积式泵

（采用同一程序它可以完成25mil和50mil密度的分发，该泵适用于SMD环氧焊锡膏。）

① 1cc＝1cm³，即cubic centimeter，为国内常用的注射器计量单位。——译者注

② 1psi＝6894.76Pa。——编辑注。

该泵能够通过编程实现1/1000s的微小增加量，变化范围为10～10000ms。对于多数焊锡膏的应用所需的喷射规模来讲，紧密引脚距元器件需要15～20ms，50mil的元器件需要50～100ms。如此短的分发时间使自动分发系统每小时分发16000点，这使其可以与市面上的绝大多数拾取放置设备相匹配。该分发系统用

于丝网印制真正的优点表现为其可编程能力，例如，对于 25mil 引脚距的应用来讲，所需焊接点的直径为 0.014 ~ 0.016in（0.35 ~ 0.40mm），对于 50mil 引脚距的应用来讲，所需焊接点的直径为 0.020 ~ 0.030in（0.50 ~ 0.75mm）。双重高度分发系统在不更换针头和程序的情况下就能够满足不同的分发需求，这一点非常重要，该分发系统对于再加工和混合技术应用来讲特别有效。

13.10.1　对焊锡膏的要求

焊锡膏必须满足下列要求：

1）膏剂中的单个粉末粒子应当与焊锡金属合金的金属粒子具有类似的分布、同等的形状和表面粗糙度。

2）焊锡膏应当具有粘接作用以使元器件保持在适当的位置直到回流操作完成。

3）必须不能让焊锡形成球状，如果它们在基板上分离，可能会造成短路。

4）在固化和回流过程中需要保持其形状，并保持在焊垫上，不允许其泄露到印制电路板不需要进行焊接的部分。

5）必须具有充足的活性，因为有时焊锡膏需要与部件接触几个小时。

13.10.2　焊锡膏的组成

可以利用的焊锡膏由几种助焊剂和金属合金组成，其浓度可能从液态膏状到粘稠的糊剂状。焊锡膏通常含有一定比例的金属银，最常用的是 2%，这样的焊锡合金的组成为 62% 的锡（Sn）+36% 的铅（Pb）+2% 的银（Ag），该合金的熔点为 179℃。粉末中必须是合金的微粒而不能是由焊锡组成的分离的金属，这将有助于使焊锡粉末的熔化温度与焊锡合金一致。除了同性质以外，焊锡粉末粒子的一个重要因素是其结构和形状必须与合金粒子的相同，因此，对焊锡粒子进行微观控制就必不可少。可接受的焊锡膏中包含的合金粒子的形状仅包括“球状”、“椭球状”、“泪滴状”和“狗骨状”。Chilton 和 Gaugler（1990）描述了焊锡膏的设计以满足紧密引脚距回流的现实需要。

球形的表面积最小，故可以最大程度的减少氧化，但焊锡膏熔化以后，液态的助焊剂会向外流，将焊锡粒子带向外面，狗骨状的焊锡粒子和椭球状的焊锡粒子可以较好的锁定在原有位置。焊锡膏中含有其他扩展的不规则形状的粒子，例如针状甚至含有灰尘等都是不可接受的。焊锡粒子直径的典型值为 20 ~ 80μm，对于丝网印制来讲，通常建议使用较小的粒子尺寸。

焊剂膏的制造既可以使用松香基助焊剂也可以使用水溶性助焊剂，焊锡膏中不仅包含合金粉末和助焊剂，还包括有机溶剂、增稠剂和润滑剂以调整膏剂的流变性质。当采用丝网印制和模板印制进行焊锡膏涂敷时，膏体的流变性质

是保证良好印制对准度的关键因素。

随着无铅焊锡膏的研制成功，也可以使用无铅焊锡膏，对于低温焊接，通常使用含有42%的锡、42%的铅、14%的铋和2%的银组成的焊锡。

13.10.3 焊锡膏的应用

回流焊接过程多数情况下以焊锡膏的应用开始，将焊锡膏涂敷在电路板的某些特殊区域上，元器件就将粘接在这些地方。焊锡膏的印制通常使用模板印制或丝网印制，用刮刀将焊锡膏在模板或丝网上刮开，焊锡膏在推力作用下就会渗入到空隙处，沉积在焊垫的适当位置上，通过焊锡膏的印制，只要这一个操作步骤就可以使所有的焊锡膏沉积在印制电路板需要的位置上。由于其灵活性，焊锡膏分配器通常用于实验室，采用焊锡膏分配器，焊锡膏可以灵活的涂敷在点状、条状的区域，在某种情况下具有更高的精度和实用性。

13.10.4 焊锡膏的处理

焊锡膏随着温度、湿度和光照而老化和变化，当进行焊锡膏处理时焊锡膏提供商建议应当采取下列预防措施：

1）将焊锡膏存储在干净、阴凉、干燥且黑暗的地方。

2）在使用冷藏的焊锡膏之前，应先将其在室温下放置24h以避免水汽的凝结。

3）不要将旧的焊锡膏与新的焊锡膏混合使用，因为助焊剂和稀释剂的挥发速度不同。

4）在使用焊锡膏进行模板印制和丝网印制之前，应将焊锡膏搅拌30s以上。

5）涂敷时只能使用干净的且不发生化学作用的工具。（例如由不锈钢、聚四氟乙烯和聚乙烯制成的工具）。

6）只能在模板或丝网上涂敷适量的焊锡膏。

13.10.5 焊锡膏的模板印制

采用模板印制和丝网印制，都可以仅用一个操作步骤就将所有的焊锡沉积在印制电路板上，当刮刀在模板或丝网上刮过以后，焊锡膏被挤进模板或丝网上的开口中，这部分焊锡膏就和电路板相接触。模板或丝网的开口与所有的焊垫图形的位置精确的对齐非常重要，因此，对于每一个电路，必须制造相应的模板或丝网。焊锡膏印制中最重要的几个参数是速度的均匀性、刮刀的速度、压力、刮刀的角度、刮刀的架空高度以及与电路板分离的速度。

焊锡膏必须是触变的，这意味着其黏度在应用过程中不断下降。触变的焊

锡膏具有特殊的内部结构，其受到机械作用，当这一剪切力移开开始复原时，其内部结构被破坏，该性质可以保证焊锡膏很好的流到电路板上。模板印制相对于丝网印制的优点是其使用寿命相当长，具有较高的和容易控制的焊锡膏厚度以及由于其架空高度较小而具有较高的精确度。架空高度指的是丝网或模板与电路板表面之间的距离。

模板通常由镀镍的金属或不锈钢制成，模板上的电路图形多数是通过激光切削而形成的，但也可以通过在正反两面进行机械蚀刻而获得。模板采用环氧树脂粘接到一个坚硬的铸铝或不锈钢框架上，该框架与印制机相连接，使用时模板必须进行精确的调整以便与电路板保持精准对齐。在具有一定模板厚度和刮刀硬度的条件下，通过保持良好的边沿对齐，与丝网印制相比模板印制可以获得具有较大厚度的湿的焊锡膏层，焊锡膏与基板之间的表面张力（粘接性）可以保证刮刀在通过丝网或模板表面以及刮刀与电路板分离时焊锡膏仍然粘接在电路板表面上。

1. 电路板固定夹具

电路板夹具在印制过程中将电路板固定好，它常常通过位于模板下面的一块真空图板来提供这一功能，使用真空图板的目的是为了在印制过程中给电路板提供支持并使其保持水平。如果电路板下面含有某些部件，在真空图板的指定位置就需要留出空间或安放支架以保护这些部件。可以使用标于模板和电路板上的对齐标志来使电路板夹具和模板进行良好的对齐，这种对齐标志也称为基准。

2. 刮刀

刮刀可以由薄金属制成，可以通过将一张纸放在下面，通过在纸上形成均匀的焊锡膏层来对刮刀的调整进行评估，来判断其设置是否正确以及所产生的压力是否均匀。最好的印制方法是在开始印制时使用较小的压力而不能使压力过大，因为这样可能会破坏模板。在进行印制时焊锡膏应当在刮刀的前面滚动，而不能在模板上留下一层焊锡膏，如果模板上留有一层焊锡膏就意味着刮刀的压力太小，在刮刀前方滚动的辊子的直径大约为15mm。

聚氨酯刮刀具有拖尾刀边或菱形截面，如图13-25所示，其硬度有好几种，在所有的刮刀类型中都需要有锋利的刀边，由于使用中刀边不断磨损，故其需要进行周期性的重新打磨矫正。

各种参考资料对刮刀的接触角都有描述，其范围是45°~80°，通常较大的印制角会使焊锡膏穿过模板的效果欠佳，而印刷角较小会导致对准度下降。

当焊锡膏在电路板上沉积好以后，刮刀后面的模板会立即抬起（弹回）并恢复到原始的架空位置，否则模板就会抹掉沉积在电路板上的焊锡膏。

Fleck（1994）描述了使用激光切削工艺制造模板的过程，这种模板可以对

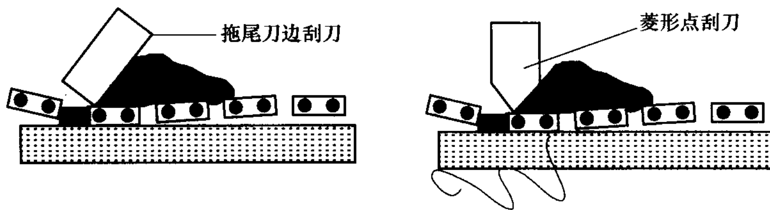


图 13-25　拖尾刀边和菱形点刮刀（经 Judd 和 Brindley 同意，1992）

沉积在印制电路板焊垫上的焊锡膏的量进行更多的控制，如果使用免清洗焊锡膏试图安装紧密引脚距元器件时，这种控制就显得更为重要了，由于没有清洗步骤来去除潜在的焊锡球，对印制沉积的要求必然更高。

紧密引脚距印制的特征是其孔隙较窄，此时金属刮刀就成了惟一实用的选择，其结实程度克服了磨损问题，它也不会由于变形而产生裂缝挖取焊锡。这种刮刀主要的危险是其对模板的撞击较大，可能会导致模板遭到破坏。

13.10.6　焊锡膏的丝网印制

丝网印制较模板印制的优点是其成本较低，而且它可以印制较大的区域，其缺点是印制的精度有限且覆层的厚度有限。在丝网印制工艺中，焊锡膏在网眼上滚过，电路板上在丝网网眼附近不需要焊锡膏的地方应涂有一层药膜。丝网可能是不锈钢的、经过金属处理的聚酯、聚酯或尼龙，将丝网在坚硬的金属框（多为铝）上拉紧，然后将这个金属框置于丝网印制设备框架的上面。

刮刀推动焊锡膏通过网眼上面的孔洞，同时紧压丝网以使焊锡膏与电路板相接触，刮刀通过以后，丝网弹回离开电路板，此时电路板上在丝网的开口处就会留下焊锡膏，焊锡膏中分离的粒子流到一起形成一层均匀的覆膜。丝网印制技术需要高超的技术和训练有素的操作人员，以保证焊锡膏相对于布置位置的位移小于 0.15mm。

1．丝网织物的分类

除了根据所采用的丝网织物材料来分类以外，还可以根据丝网网眼的数目来分类，也就是根据每厘米的丝线（开口）数目来分类，例如“55-T”表示每厘米含有 55 条丝网印制织物，或者说相当于每英寸含有 140 条丝网印制织物。丝网所使用的材料包括：

1）不锈钢：它的使用寿命较长，且提供极好的规定对准度和焊锡膏流动，可以避免静态电荷的积累，所需的架空高度也较低。

2）用金属处理的聚酯：它具有较高的抗磨耐蚀性，允许良好的焊锡膏流

动，金属表面可以防止静态电荷的积累。

3）聚酯：它比不锈钢具有更好的弹性而且便宜，如果电路板焊接不平整就更需要弹性大的丝网材料。

4）尼龙：它具有极好的弹性。

构成网眼的丝线每厘米应当大约有 30 根，丝线之间的距离最小应当是焊锡膏中最大焊锡粒子直径的三倍，表 13-3 给出了一些用于焊锡膏印制织物的选择。

表 13-3　几种用作焊锡膏印制的织材（经 Braun 同意，2003）

织物数量		材料	网眼开口	丝线直径	理论焊锡膏厚度
/cm	/in		/μm	/μm	/μm
43	110	不锈钢	160	71	82
67	170	不锈钢	100	50	49
24T	60T	聚酯/金属	285	120	105
32T	82T	聚酯/金属	195	105	70
36T	92T	聚酯/金属	165	95	60
43T	110T	聚酯/金属	144	84	55
20HD	51HD	聚酯	300	200	144
24T	60T	聚酯	275	150	111
27T	68T	聚酯	250	120	65
34HD	85HD	聚酯	175	125	73
40HD	100HD	聚酯	149	100	71
43	110	尼龙	128	88	51

注：T 为标准等级；HD 为加厚等级。

2. 框架

只有使用坚硬的框架才能获得所需的网眼张力以进行精确的印制，铝是丝网印制框架最常用的金属。人们很少使用钢制框架，因为它们容易生锈，而且对于同样尺寸的框架来讲，不锈钢框架的重量几乎是铝的三倍。但是，人们有时也必须考虑铝的线性热膨胀系数高达不锈钢的两倍这一事实。

例如：不锈钢：温度升高 5℃时 1m 膨胀 0.06mm；

铝：温度升高 5℃时 1m 膨胀 0.13mm。

框架的尺寸应当足够大，使图像外边缘与框架内边缘在所有四边之间的距离至少为 150mm，如果此距离太小，则会增加调整的困难程度，因为随着架空高度的增加以及刮刀与框架之间距离的减小，失真会增加。

3. 架空高度和框架升离

架空高度是指丝网或模板与电路板表面之间的距离，较高的织物张力可以允许较低的架空高度，当刮刀开始印制时框架在边缘附加的抬升称为框架升离。这一抬升由先进的印制设备在刮刀运动时来提供，通过此增加的高度来确保相同的架空高度。同样，电路板与丝网之间的角度也将通过在丝网上移动刮刀来维持不变，通常，架空高度的设置应当尽可能的低，使用高张力的织物，人们就可以获得较低的架空高度。

4. 织物的拉伸

丝网印制织物可以通过空气作用或机械的方法进行拉伸，新拉伸的织物通常在拉伸后的1h内失去10%～20%的张力，这根据织物的类型、拉伸设备、框架的稳定性以及给框架上的织物涂胶前的剩余时间而略有不同。因此，为了更加精确的工作，推荐在丝网拉伸后进行板模制作前留出12h的休眠时间。织物的抗张拉力依赖于所使用的材料以及丝线的直径，丝线张力的大小与丝线直径的平方成正比。

5. 去油脂

常常建议在每次使用之前对板模进行去油脂操作，这可以通过商用丝印去油剂或采用浓度为20%的苛性钠完成，但需要在漂洗以后，使用浓度为5%的醋酸进行中和。

6. 印制速度

典型的印制速度为每秒钟20～80mm，这依赖于所使用的焊锡膏的触变性，印制速度通常由焊锡膏的制造商推荐。当焊锡膏在丝网上移动和滚动时，焊锡膏中的液体越多，则可能获得的印制速度越大。开始印制时在焊锡膏接触丝网孔隙之前，印制速度至少要达到90mm/s，以使焊锡膏达到其触变性能。

丝网网眼的数目指的是开口的数量或每英寸丝线的数量，用于焊锡膏印制的网眼的数量通常在60～200之间。典型的最大焊锡粒子不能超过网眼的1/3，以防止阻塞。例如，一个80个网眼的丝网其开口大约是224μm，故此时焊锡粒子的尺寸不应当超过75μm。具有细小网眼的丝网可以用于精细的焊锡膏沉积，一个具有180个网眼的丝网使用其中的80个网眼，并采用精细的焊锡膏粉末可以制造出100～150μm的沉积厚度。Hall（1994）提出了为获得低的缺陷率对丝网印制机的需求，Noble和Moore（1992）说明了确定丝网印制机印制精度的方法。

13.10.7 焊锡的预成型

预成型是使焊锡或焊锡膏形成大致的形状，它包括完成提供焊接点所需的焊锡的数量，将其放置在将要焊接的部件之间然后将其熔化。预成型为焊锡提

供经过仔细控制的形状以及仔细控制焊锡合金的量，典型的，预成型将焊锡冲压成条状。某些预成型过程将助焊剂作为焊料的一部分，在含有助焊剂的预成型过程中，允许对焊锡合金的放置进行完全的控制，以保证焊接点在设计者指定的位置而不是其他地方成型。通常当组装的电路板不平坦或由于其他原因导致不允许使用印制技术时就使用预成型技术。

13.10.8　免清洗焊锡膏

免清洗焊接过程正在成为许多印制电路板组装者的选择（Bauer，1994），在工艺上免清洗焊锡膏特别重要，它可以分为两个主要的类型：标准免清洗焊锡膏和低残留免清洗焊锡膏。

1. 标准免清洗焊锡膏

典型的标准免清洗焊锡膏是基于松香的，它含有 35% ~50% 的固体形式的助焊剂，3.5% ~5.0% 为膏剂形式，这类膏剂的绝大多数不需要像氮气等这类特殊的气体，因为回流焊接形成的焊接点的质量非常好。免清洗焊锡膏的沾锡可能是一个问题，但这常常要上溯到电路板或元器件的焊接性问题，过多的残留量会干扰测试。

2. 低残留免清洗焊锡膏

低残留免清洗焊锡膏是基于松香或合成纤维的，典型的超低残留焊锡膏是非松香基的，它含有合成纤维成分。低残留免清洗焊锡膏的主要优点是残留水平大大降低，低残留免清洗焊锡膏通常需要像氮气这类化学作用不活泼的气体。

13.11　混合组装技术中粘结剂的使用

目前在许多印制电路板设计中，一些 SMD 都安装在电路板的背面，通孔元件以及大的 SMD 焊接在电路板的正面。当 SMD 和通孔贴装元器件结合在一起时，这样的电路板就称为采用了混合贴装技术。

在混合技术组装中，电路板背面的 SMD 上需要使用粘结剂，以使其在后续的元器件放置和波峰焊接操作中不会跌落下来。

13.11.1　对粘结剂的需求

粘结剂的选择应当满足下列基本需求：

1）在固化过程中使元器件保持在给定的位置上；

2）在波峰焊接操作中维持元器件的定位；

3）不同的表面使用不同的粘结剂；

4）暴露在助焊剂和波峰焊接中不能受到此类环境的影响；

5）在整个组装中粘结剂必须是化学反应不活泼的。

表面贴装技术组装中所使用的粘结剂通常是环氧树脂和丙烯酸树脂，粘结剂必须放置于阴凉、干燥、黑暗的地方。

环氧树脂能够提供良好的绝缘阻抗，较高的粘接强度和较低的固化温度，其缺点是在维修过程中发生故障的元器件很难从电路板上移除。它是典型的单成分热固化系统，在多种具有特殊需求的配方应用中都有使用。

丙烯酸树脂粘结剂的固化时间很短，具有由分散点构成的高峰值曲线和良好的温度稳定性，通常使用紫外线或红外线能量进行固化。其主要缺点是这类粘结剂的抗剪强度较低，所需的固化温度相对较高。

丙烯酸环氧树脂粘结剂性能相对于简单的环氧树脂和丙烯酸基粘结剂来讲，有了很大的提高，丙烯酸环氧树脂粘结剂有着两种类型粘结剂的优点。其粘滞度和温度稳定性非常好，使其可以在室温条件下储存一年以上，其粘接强度很好，强度也不至于使再加工变得困难，通过加热或紫外线照射或以上两种方法的结合可以使丙烯酸环氧树脂粘结剂迅速固化。Harris（1991）描述了各种粘结剂的类型，特别着重描述了丙烯酸环氧基的产品。

13.11.2 粘结剂的应用

可以采用许多不同的技术进行粘结剂的应用，最常用的方法是注射器分发和模板印制方法。

13.11.2.1 注射器分发

粘结剂常常通过拾取放置设备上的喷嘴在放置元器件之前使用，对于每一个将要粘接的元器件，最合适的粘接点的分发是根据可利用的空间和元器件的尺寸来确定的。有许多种不同类型的机械装置用来使粘结剂在压力下通过喷嘴施加到印制电路板上，其中主要是由空气推动的。每一种系统都有其优势和缺点，例如，可能出现一种系统使用的粘结剂容易清洁而另一种可能具有更好的使用点尺寸可重复性。目前的超高速分发系统的分发速率达到了每小时100000点，注射器分发系统的主要优点是其操作的灵活性。

13.11.2.2 模板印制

在该方法中，使用刮刀推动粘结剂使其沿着孔隙前进并保证填满孔隙，并与电路板相接触着刮过模板，必须保证在电路板上使用粘结剂时其位置要正确的排列在合适的位置上。模板印制中重要的几个参数有速度均匀性、刮刀速度、压力、弹回高度和电路板分离的速度。在印制中电路板必须保持平整，需要注意以下3点：

1）刮刀的速度与粘结剂的粘滞度密切相关，粘滞度越低速度越快，例如，粘滞度较低的粘结剂每秒大约印制20cm，而粘滞度较高的粘结剂每秒只能印制

大约 1.3cm。

2）压力：粘滞度较高的粘结剂要比粘滞度较低的粘结剂需要更大的压力，单凭经验的方法可知充足的压力能在每个印制回合后使模板上的粘结剂被擦干净。

3）印制中使用的粘结剂应当具有触变作用，这意味着粘结剂的粘滞度随着印制过程的进行而降低，这可以使粘滞度适当的流到电路板上。

用来印制的粘结剂的模板通常是不锈钢的，但现在塑料模板正变得越来越普遍。塑料模板的优点是其柔韧性减少了对模板周期性的清洗，不像不锈钢模板那样需要经常清洗，但塑料模板不如不锈钢模板耐用。

金属模板的使用寿命要比网筛的寿命长，网筛随着使用其弹性会逐渐降低并可能变形，影响其印制精确度。模板潜在的印制次数为 50000 次，而网筛的印制寿命仅为 5000 次，模板实际上是制造被称作紧密引脚距印制点（定义为密引脚距小于 20mil）的惟一的方法，已经证明它在实际应用中可以达到 12mil。

模板印制使用的粘结剂必须设计成可以暴露在室温条件和中等湿度下，良好的粘结剂印制效果可以采用聚氨酯刮刀或由金属制成的刮刀来获得。

尽管模板印制设备可以用来在印制电路板上沉积粘结剂，但其沉积的质量常常不令人满意，这是由于模板印制中焊锡膏的流变能力完全不同于 SMD 中的环氧树脂。焊锡中含有铅和助焊剂，这两种物质使焊锡具有光滑的表面，而环氧粘结剂则是一种黏性很大的物质。

分发系统位置的准确性是数据驱动的，每一个沉积的点都由计算机辅助设计系统中的数据位置来衡量，任何转动的偏移或印制电路板电路图形的扩张/收缩都会得到补偿，对其逐点进行基准修正。Duck（1996）指出模板印制不是基于位置修正的，而是根据最佳拟合算法的，由于电路板制造过程中的波动引起印制电路板材料尺寸的变化，模板不能随着这一变化而改变，为克服这一问题，分发系统通过利用支持销钉和真空支承来弥补电路板厚度和弯曲度的波动。

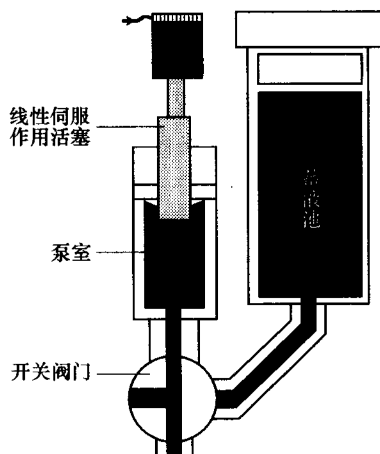


图 13-26　容积式线性泵

选转式泵（也称为螺旋泵）对于在收缩封装设计中进行精细分发来讲，其精确度不够。如图 13-26 所示的线性泵是真正的容积式活塞泵，它克服了这些缺陷。

这种泵不受液体粘滞度、简单压力、针头尺寸和液体/泵温度的影响，这类泵的伺服驱动装置可以允许可编程的发射尺寸和流量。

该项工作完成后的基本步骤是移开并正确的处理没有用完的材料，然后去除刮刀上的粘结剂并清洗，检查刮刀的刀刃看是否有缺口，最后立即将模板清洗干净。粘结剂最终将在室温下固化，这样它就会变得非常难以去除。

13.12 批量焊接

术语“批量焊接”或“自动焊接”用来描述那些同时完成数个的焊接点的焊接方法，而不必人工使用焊锡或对焊接表面进行加热。这样，批量焊接法就提高了电子组装生产的速度，另外，大多数自动焊接系统都提供充足的通风，因此可以更好地保护员工免受焊料烟气的伤害。

采用自动焊接的驱动力一方面是大规模的生产能力需要应用现代化的批量生产，另一方面是产品可靠性要求，因为这类产品具有大量非常精细的焊接点，这些焊接点不可能用手工焊接完成。对于高密度互连（HDI）电路板来讲，由于板子上焊垫和连接盘的尺寸较小，使用的材料较薄，电路部件也更精细，其组装只能采用自动方式。

13.12.1 浸焊

浸焊是批量焊接中最简单的一种方法，焊接时将涂有助焊剂的电路板慢慢的垂直浸到盛有熔融焊锡的焊槽中，在水平方位上缓缓移动。焊接时将电路板浸没到焊锡槽中所需的深度直到电路板表面被焊锡完全浸润，浸焊装置如图13-27所示。电路板与焊锡保持接触达到所需的停留时间后，将电路板从焊槽中取出，通常，印制电路板批量焊接的温度保持在240～250℃，平均接触时间不超过5s，一般情况下2～3s的接触时间就可以获得满意的焊接效果。基本浸焊过

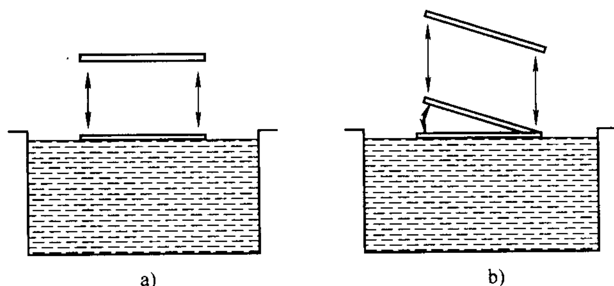


图13-27 浸焊原理

a）水平浸入 b）倾斜浸入

程已经进行了相当大的改进，速度大大提高，也可以进行自动操作。

13.12.2　拖焊

最早的自动焊接方式就是“浸入拖动焊接”，焊接过程中将组装好并涂有助焊剂的电路板以水平位置慢慢的浸入到熔融的焊锡池中并沿着表面进行拖动。在静止的焊锡池焊锡表面上将电路板拖动预先确定好的一段距离，然后将其从焊锡池中取出，通常，电路板以 15°的倾角浸入到焊锡槽中，随着电路板逐渐的运动，此角度逐渐减少到 0，当电路板再次从焊锡槽中取出时，此角度又从 0 增加到 15°。采用这种方式，可以避免“冰锥现象”的形成，多数情况下，电路板运动时安装在运载器上，运载器的前沿有一个刮板，用以去除浮在焊锡池表面的浮渣。

尽管拖焊可以制造高品质的焊接点，但对于规格较大的现代电路板，拖焊并不是一个可选的焊接方法，因为它具有以下几个缺点：

1）印制电路板与焊锡较长的接触时间增加了基材和元器件的加热程度。

2）较大的接触面积使得产生的气体难以逸出，故产生的吹孔缺陷的数量较多。

3）熔融焊锡的表面浮渣开始形成的速度较快。

目前浸入拖动焊接方法多数情况下已不被采用，一种称为波峰焊的技术被广泛的使用。

13.12.3　波峰焊

印制电路板上通孔元器件批量焊接的标准方法是波峰焊，即让装配板经过涌起的焊锡波峰，其设备和工艺发展很快，SMD 的组装焊接也可以应用此项技术。这种焊接方法的突出优点就是它可以成功的应用于同时包含插孔安装和 SMD 的这类“混合技术”组装的电路板（Buckley，1990）。

波峰焊单元基本的部件是传送系统，它将装配板或组装板采用连续或阶段的方式从装载位置依次经过助焊剂涂敷站，预加热阶段，波峰焊以及冷却设施，然后在卸载位置从传送装置上将电路板取下。

进行助焊剂涂敷以后，传送装置将组装板传送到预加热区域，在这里将其缓慢的加热到接近 T_G 值（基材的玻璃态转换温度），一直到树脂与铜箔以及树脂与加强层不再发生分离的温度为止。经过预加热区域组装板进入焊锡槽，焊锡槽里面的熔融焊锡以波浪的形式施加到组装板的底面。进行波峰焊时的温度范围是 235～260℃，焊锡与电路板的接触时间为 1～4s，经过熔融焊锡的元器件必须能够耐受这一处理过程，既不受这一高温的影响，也能够经受相关的温度变化率，而且元器件上可以进行焊接的表面物质不能过多的溶解到熔融

的焊锡中。在冷却部分，组装板冷却下来，焊锡凝固，提供预期的机械和电气连接。

波峰焊设备需要仔细地进行调整，包括助焊剂的施加，预加热温度的正确设置，焊锡波浪高度的设定，传送装置的速度，焊锡的温度以及组装板传送的平稳程度，特别是在组装板冷却过程中更应如此。

有些公司为了降低低助焊剂的残留，采用带有氮气层的焊接机械设备。氮气层降低了氧气的浓度，使氧气的浓度保持在一个很低的水平，没有了氧气，氧化过程或腐蚀就很难发生，这样，该设备就消除了或至少是减少了后续的助焊剂去除工作。

这类设备中，在焊接区域气体喷射装置喷出氮气并使其通过管道循环，用氮气来取代加工腔室中的氧气可以获得更高的焊接质量，避免胶渣的形成并能够使热量更好的渗透，这是因为与空气相比，氮气的对流系数更高，另外，这样可以在整个工作宽度内获得更加一致的温度。该设备含有耗氮量很低的气体清洁设施，为便于在整个工艺过程中进行组装观察，该管道应做成透明的。Gothard（1991）阐述了惰性气体波峰焊接的发展，包括在现存设备中使用的花样翻新的成套工具。

13.12.3.1　电路板的助焊剂涂敷

波峰焊接设备中助焊剂涂敷是将助焊剂涂敷到组装板的底面，以把将要焊接部件的表面上的氧化物去除，同时保护这些表面，以防止其在预加热区域发生进一步的氧化。

当助焊剂接触加热的组装板上暴露的金属时，它会发生化学反应，将氧化物和污染物予以去除，使这些氧化物和污染物被熔融的焊锡带走。为保证焊接效果最佳，留在电路板上助焊剂的量有一个最佳范围，它依赖于：

1）助焊剂使用的方法；

2）所使用液体的数量；

3）溶剂与助焊剂溶液的分数比值，即应用与焊接之间助焊剂的粘性和蒸发性能。

助焊剂常常以液态的方式进行涂敷，以便迅速平整的覆盖所有的焊接区域。

向电路板上涂敷助焊剂有不同的方法，其中，最常使用的是泡沫助焊剂涂敷方法、波峰助焊剂涂敷和喷洒助焊剂涂敷。通过这些方法的应用应当在电路板背面形成连续的助焊剂薄膜，只有这样才能促进镀铜孔中的毛细提升，润湿的助焊剂通常形成一个 5 ~ 20μm 厚的薄层。在焊接中，该薄层有助于去除氧化膜，进而减少由于过多的焊锡从波峰焊接槽中带出而形成焊锡桥接这一现象。

1．泡沫助焊剂涂敷

在该方法中，液态的助焊剂从一个大的储液槽中施加到电路板上，此时采用一个通风装置产生一个剧烈的沸腾状泡沫表面，并使组装好的电路板的背面紧贴该表面穿过，该装置如图 13-28 所示。压缩的、清洁干燥的空气从浸没在存有助焊剂的储液槽中的多孔石（或管道）中穿过，在一个较宽的喷液口顶部形成一个泡沫突起，并使凸起的顶部刚好到达传送装置。当低压压缩空气穿过管道的孔隙吹出，它产生细小的泡沫，通过挡板将其引导到表面上，表面上破裂的气泡有助于使助焊剂涂敷到通孔的孔壁上。泡沫超出喷液口的高度是有限的，如果由于穿过泡沫助焊剂涂敷装置的电路板上元器件的引脚过长，所需要的喷液高度较高，可以通过触片来增加辅助泡沫的突起。对于控制泡沫的高度来讲，助焊剂的粘度是一个重要参数，如果粘度太高，则气泡不能适当的破裂，这种情况下，泡沫就有可能失去控制上升太高而导致溢出；如果粘度太低，获得泡沫作用可能非常困难。该方法的优点是其涂敷非常迅速且助焊剂涂敷的量与传送装置的速度无关。

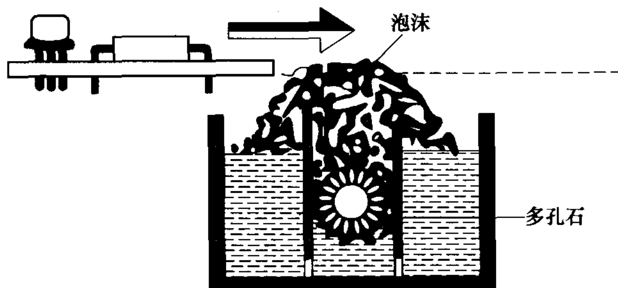


图 13-28　泡沫助焊剂涂敷方法

2. 波峰助焊剂涂敷

在这种方法中，助焊剂的涂敷是将电路板穿过助焊剂固定波峰的顶部，其装置如图 13-29 所示。采用一个泵迫使助焊剂穿过一个较宽的喷液口，并使液体在其顶端溢出，以形成一个波峰，将组装好的电路板在波峰中通过。采用波峰助焊剂涂敷时，该系统操作简单、易于维护，但此方法常常由于过高的流体压力而导致涂敷的助焊剂比所需要的多得多，因此，操作时对泵的涡轮的控制就成了一个关键因素。

许多波峰助焊剂涂敷装置都在助焊剂涂敷完成以后立刻使用气刀以去除多余的助焊剂，操作时小流量的空气经过仔细的调整以一个微小的角度向后作用在电路板上，这样就不会吹掉所有的助焊剂，气刀可以帮助助焊剂的扩散并使其进入到通孔中。如果电路板上过多的助焊剂不予以去除，在预加热过程中过多的助焊剂可能会滴落下来从而引起火灾。

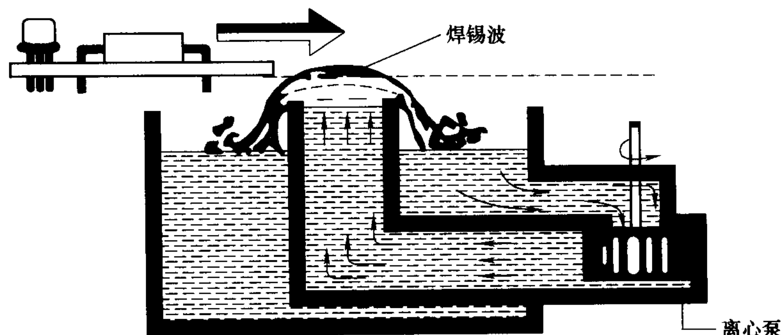


图 13-29　波峰助焊剂涂敷装置

3. 喷洒助焊剂涂敷

喷洒助焊剂涂敷使液态助焊剂产生定向的喷洒，将其涂敷到组装好的印制电路板的底面。该系统或者使用来回往复的喷嘴，或者使用固定的喷嘴喷洒技术，它们都利用计算机编程来对助焊剂进行精确的控制，使助焊剂相当准确地涂敷在电路板指定的长度和宽度内。无论哪一种系统，计算机都采用光导纤维或接近开关感应电路板的速度以形成所需的信息来计算所需的覆盖范围。一种喷洒助焊剂涂敷装置如图 13-30 所示，它包含一个带有近距离放射状弹簧叶片的转轮，通过在储液槽中转动加载助焊剂，当转轮旋转时，助焊剂就依次从每一个叶片中涌出，涂敷到电路板的下面。

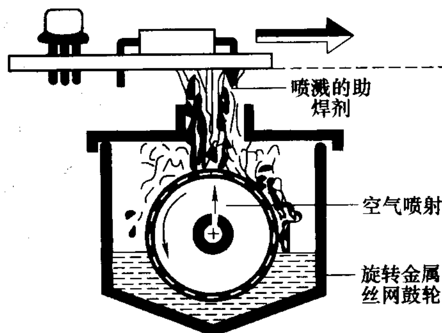


图 13-30　喷洒助焊剂涂敷装置

涂敷到电路板上的助焊剂的量有赖于溶解到溶剂中的固体助焊剂的量，此参数一般通过液体的密度来监控和保持，这一操作既可以自动操作，也可以使用液体比重计操作。

根据所使用的助焊剂涂敷方法，助焊剂的涂敷过程常常伴随着污染物的产生，使用泡沫助焊剂涂敷和波峰助焊剂涂敷需要定期检测助焊剂溶液中污染物的含量，因为在进行电路板助焊剂涂敷时助焊剂会连续不断的将电路板上的污染物带到助焊剂溶液中。所以要根据所使用助焊剂的类型和已经涂敷的区域来定期地进行助焊剂涂敷装置的清洗和再填充。对于喷洒助焊剂涂敷来讲，本质上不存在助焊剂污染问题。

波峰焊接后对电路板的清洗非常必要，因为其上的松香助焊剂需要清洗。不含松香成分的助焊剂消除了松香残留这一问题，提供了一种真正的免清洗溶液。Taylor（1991a）描述了复杂合成助焊剂的发展过程，这类助焊剂克服了与松香基助焊剂相关的大多数问题，并给出了使用合成助焊剂使用波峰焊接工艺获得高质量焊接强度的控制过程（Taylor，1991b）。

电路板助焊剂的涂敷阶段和波峰焊接之间经常有一个预热阶段，三者常常合为一体，之所以需要一个预热区有几个原因，这几个重要的因素是：

1）助焊剂的活化：预加热支持助焊剂在组装板上的通孔中不断上升，这样有助于组装板正面通孔的焊锡填充。

2）通过升高组装板的温度使其与焊接温度更加接近，这就可以缩短焊接时间，如果没有预加热，所需的热量全部来自波峰焊接，则焊接需要较长的停留时间。

3）组装板的温度从室温到波峰焊接温度升高的太快会发生热冲击，这一极度的温度脉冲会破坏某些热敏元器件，还可能引起电路板的向下弯曲和扭曲。

4）使助焊剂溶剂蒸发：否则残留的助焊剂溶剂可能进入焊锡波而引起吹孔。

5）使电路板中的湿气蒸发：这些湿气会引起吹孔。

预加热是“热曲线图”的重要组成部分，它可以通过热风的循环对流、红外线灯的辐射、热的金属板或上述几种方法的结合来获得热量，前面所提到的辐射热作用到电路板的底面或焊接面。

波峰焊接设备的预加热阶段将电路板的温度升高到 80～120℃，最常使用的助焊剂的载体是异丙醇，其沸点为 82.4℃，因此助焊剂载体在电路板预加热阶段的蒸发和最终挥发非常迅速。

13.12.3.2　焊接区域或焊锡波

焊锡波有两个基本的作用：①它将热量传递到元器件的引脚、焊垫和镀铜孔中；②递送焊锡以完成机械连接和电气连接。

为完成上述功能，需要熔融焊锡的连续再补充，可以通过从集液槽中将熔融焊锡泵起来完成焊锡的再装满。装配好的印制电路板从焊锡波的顶部经过，其装置如图 13-31 所示。

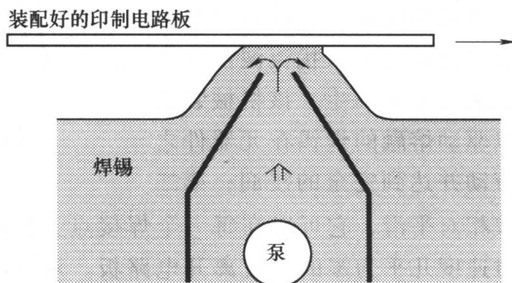


图 13-31　波焊设备

该装置使用电子控制的泵电动机以避免在焊锡固化过程中泵开始工作和焊锡没有完全熔化时

接通泵的开关。某些焊锡罐由一个喷嘴产生一个波峰，有些焊锡罐装有两个喷嘴，可以产生两个波峰。

每一个焊锡槽都应配备控制热量设定的设施，对于单波峰来讲，温度应设定在 250 ~ 257℃，对于双波峰的焊锡槽来说，焊锡槽的温度应该维持在 245 ~ 255℃。

对于单面板，插入的元器件引脚在电路板背面被焊接到焊垫上，对于含有镀通孔的双面板和多基板来讲，焊锡在毛细管作用和液体静压力的作用下穿过通孔上升到元器件引脚的周围，这样焊锡就填充了通孔，并流到电路板正面可进行焊接的焊垫上。元器件插入通孔后将元器件的引脚轻轻弯曲以避免由于浮力的影响使其从通孔中移出，否则在电路板通过波峰时会导致元器件从电路板上漂浮起来。

不同的设备制造商使用各种不同形状的焊锡波，在最简单的波峰焊接装置中，锡波在喷嘴的两侧回落到焊锡槽中，该系统升级后的装置如图 13-32 所示。图中在喷嘴的两侧提供了犁臂延长板以更好地形成锡波的外形，该装置有助于将过多的焊锡拉回，因此减少了桥接形成的可能性。就是焊锡波的形状再好也会出现类似阴影等问题，当 SMD 安装在电路板的背面时常会出现这种现象，因为元器件体本身阻止了焊锡到达 SMD 后面的部分。

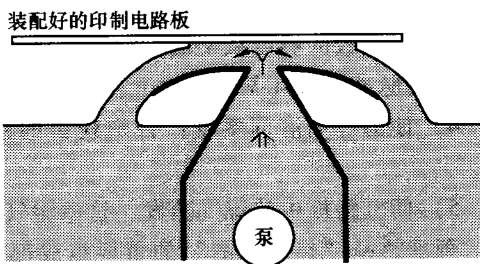


图 13-32　使用犁臂延长板来控制锡波的形状和接触时间

为了克服这一问题，人们开发出了双波峰焊接设备，该设备的工作原理简图如图 13-33 所示。该设备由第一个扰流波和第二个平流波组成，扰流波由一个机械装置喷射产生，该机械装置可以驱动熔融的焊锡在元器件之间流动并达到完全的浸润；第二个波相对平滑，它可以在每一个焊接点上控制熔融焊锡形成弯月面，平流波以相对速度几乎为零的速度离开电路板。双波峰焊接设备特别满足了采用表面贴装技术和混合技术的电路板的需要。

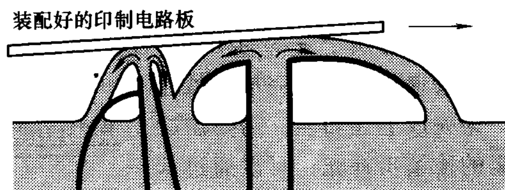


图 13-33　双波峰焊接设备示意图

某些系统在波的末尾还有一个热气刀，它可以将多余的焊锡吹掉并使其回

落到焊锡槽中。焊锡波刚刚离开，当焊锡还处于熔融状态时，用气流将焊锡从没有达到浸润的地方移开。特别是当焊接点距离较近时，多余的焊锡会引起桥接，另外，使用气刀可以使不浸润的区域更加容易发现，从而减少检测时间。但为了有效地使用气刀，气刀的接触角、气体温度、气体压力是非常重要的参数，需要准确调整。

将油作为添加剂添加到熔融的焊锡中有助于消除焊锡的桥接，它还可以通过控制焊锡波表面氧化层的形成来消除焊锡层的过厚累积，特别是在双波峰焊接中更是如此，集液槽中焊锡表面的油脂层抑制了胶渣的形成。波峰焊接中所使用的油脂是矿物油和脂肪酸的混合物，称为焊锡油，这种油在 250℃ 时应当是化学反应不活泼的，且在该温度下应很少发生分解。

焊锡井中的胶渣必须进行周期性的清除，否则，胶渣会与焊锡发生乳化，到达电路板上以后会导致桥接，形成颗粒状的焊接点等。一段时间不使用波峰焊接设备时应使泵停止运作，使用最小的波峰高度可以减少胶渣的形成。

13.12.3.3 传送系统

传送设备穿越所有其他的单元，将组装板从装载位置传送到卸载位置，它控制电路板穿过各个制程的速度，基本上控制了波峰焊接过程中的预热时间、温度和停留时间，传送设备通常分为以下两类：

1）棘爪类型：棘爪传送设备有两个平行的轨道，棘爪在其上驱动，传送带可以是水平的或倾斜的，其倾斜的角度可以在 4°～8°之间调整。棘爪包括一个长方形的框架，框架上有将电路板保持在固定位置的设施，它可以进行调整以适用于不同尺寸的电路板。

2）指爪类型：电路板固定在弹簧夹中，弹簧夹可以进行调整以容纳不同宽度的电路板，这种类型便于装载和卸载。这种传送设备也含有两个平行的轨道，轨道上有固定有一条链子，链子上有适应磨尖的不锈钢或钛合金的突起，这些突起可以支撑电路板的边缘，图 13-34 给出了一个指爪传送带的简图。

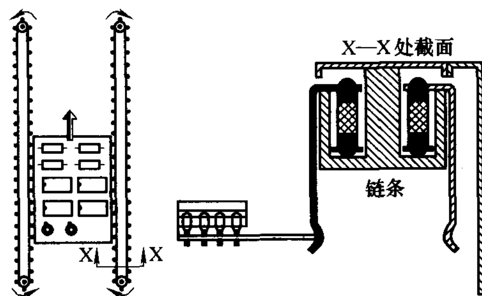


图 13-34 指爪传送设备简图——两条轨道上的每一条都包含一个封闭的环形链条，围绕着两个链轮旋转（经 Leonida 同意，1989）

传送系统关键的调整包括轨道/指爪的宽度和平行关系、传送带的速度、轨道与焊锡槽的角度、自由驱动时的平稳度和振动（特别是在固化阶段和装载阶段）。也有分段的传送设备可供使用，在助焊剂涂敷、预加热和焊接槽这三个主要的位置有独立的速度控

制系统。有些波峰焊接设备的生产商还在接触熔融焊锡的部分提供聚四氟乙烯外面镀一层钛金属膜的指爪。

穿过焊锡波时传送带的调整可以是人工的也可以是机械化的，电路板上将要进行焊接的焊接面上的某一点与熔融焊锡的接触时间（T）应当超过2s，这一时间用来形成至少0.5μm厚的分子间键，如果接触时间大于2s，应当保持分子间键的厚度小于1μm。

1）接触长度（L）：可以通过观察焊锡波上面跨在传送带上的硼-硅-铁合金玻璃板来衡量，这种硼-硅-铁合金玻璃板上有内嵌的刻度，当玻璃板通过焊锡波时就可以读出接触长度（L），注意不通过电路板读数。

2）传送带速度（V）：可以通过电路板在规定的时间内运动的距离来衡量，并与分压器设定的速度相比较。通常测量1min内移动的距离，这样就可以每分钟都在仪表上直接读出传送带的速度了。

T = 接触时间（单位为s）

L = 接触长度（单位为mm）

V = 传送带速度（单位为m/min）

$$T\text{ (s)} = \frac{L\text{ (mm)}}{V\text{ (mm/s)}} = \frac{L\text{ (mm)}}{V\left(\dfrac{1000\text{mm}\times 60}{1000\times 60\text{s}}\right)}$$

$$= 0.06\times\frac{L\text{ (mm)}}{V\text{ (m/min)}}$$ ⊖

13.12.4 回流焊接

回流焊接（Filleul，1990）是通过重新熔化先前施加的焊锡层来进行焊接的一种工艺，在焊接过程中不再使用焊锡。焊锡的沉积层通常使用焊锡膏，它使用在印制电路板上，将元器件贴在焊锡膏上后，就可以进行加热，开始实施焊锡重熔了。

回流焊接两种最常用的方法就是红外加热和强迫对流，有时也使用气相焊接，但这种方法不是很常用。完成焊接工艺最受欢迎的一种方法是红外加热和对流的组合，大约60%的热量传递来自热风的对流，另外40%的热量传输来自红外辐射或加热板。回流焊接炉内产生的热量需要进行精细的调整，如果组装板加热的温度太高，可能会破坏电路板或某些电子元器件；另一方面，如果组装板加热不充分，就不能进行良好的焊接。在整个回流焊接过程中，各个位置温度与时间的关系称为热曲线图，每一个焊炉以及每一个组装板都有其独特的热曲线图，它给出了组装板在各个阶段温度相对于时间的图线。通常，热曲

⊖ 本书此处有误，“$T=0.06L/V$”应改为“$T=L/(0.06V)$”。——译者注

线图包含五个阶段，采用共晶点为179℃的焊锡。

1）预加热区域

① 在第一阶段将组装板的温度缓慢的从环境温度升高到大约80℃，温度升高速率不超过2℃/s。

② 在第二阶段将组装板的温度升高到基板的 T_G 值（对于FR-4为135～145℃），温度升高速率大约为3～4℃/s。

③ 在第三阶段将温度缓慢的增加到155℃，其温度升高速率不超过0.5℃/s。

2）回流区域：将温度统一升高到215～235℃。

3）冷却区域：非常快，但速率限制在小于5℃/s。

1. 预加热区域

该区域传递少许的热量，使温度缓慢、均匀、逐渐的增加到接近155℃，“预加热区域”完成下列功能：

1）助焊剂的活化；

2）防止向电路板和元器件一次性的提供全部所需的热量而引起热冲击，这类热冲击可能会导致电路板和某些元器件的损坏；

3）使电路板上的湿气和挥发性物质蒸发，否则它们可能会从焊锡中猛烈地冲出，引起吹孔。

2. 回流区域

该区域完成焊锡的重新熔化并发生沾锡作用，对于该区域来讲，为形成适当的分子间键，热量传递的方法、重熔区域的温度以及传送带的速度是非常重要的因素。

衡量电路板上给定点温度升高的速度有好几种方法，相应的，在焊接点提供合适的温度是一个非常重要的问题。

3. 冷却区域

冷却过程使焊锡和组装板缓慢的冷却到室温，并使元器件与电路板最终完成电器和机械连接，冷却阶段必需适当的控制温度，使温度的降低不至于太快。

13.12.4.1　对流系统

在对流系统中，将循环流通的热风吹到组装板上使焊锡重熔，惰性气体（氮气）通过电加热线圈过度加热后通过喷嘴吹到将要进行重熔焊接的地方。气体的温度范围是150～170℃，用于控制热风的喷嘴的直径小于2.5mm，要得到良好的焊接质量需要控制的关键参数是回流时间和热风温度。

在自由对流中，紧挨着热源下面的高能空气粒子层逐渐转变成缓冲层，其下面是一层较薄的分界层，下面的这层可以使热交换慢下来，这是由于气体和固体的接触较少以及某些气体的绝缘性能导致的。

通过使用不平整表面传送设备（见图 13-35）、增加热源的温度、利用强迫对流可以加速热量的传递，但热源温度的改变可能导致某些组装板被烧坏，这些组装板却不能得到有效的重熔。另一方面，在不考虑传送设备的条件下，强迫对流可以在较低的热源温度下加速热量的传递。

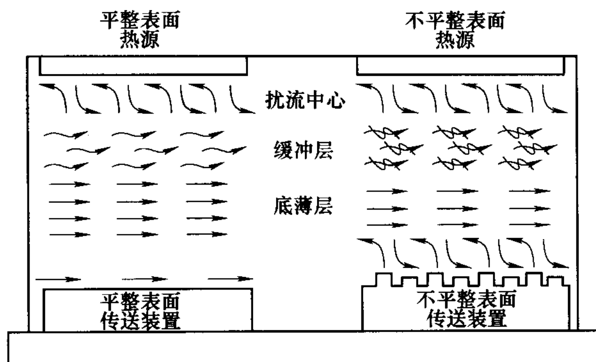


图 13-35 不平整表面传送装置加速了对流系统的空气粒子流动和热量交换
（经 Dytrych 同意，1993）

13.12.4.2 辐射系统

辐射系统中，采用放射线的能量对吸收射线的表面进行加热，吸收系数取决于辐射射线的波长、表面的材料、颜色以及表面性质。有好几种红外线辐射源可以使用，最常用的辐射源是钨电子管、镍铬耐热合金电子管以及嵌板间接辐射类型。每一种类型的辐射源对应不同的红外频谱，相应的加热炉制造材料的不同、所使用气体不同构成不同的环境都会有不同的加热效果。各种加热装置是热源直接辐射、炉壁辐射、气体的传导和对流综合作用的结果。

表面贴装组装板加热炉设计时通常采用矾土/硅土裱在砖砌内壳的外面作为绝缘层，整个结构包裹在外面的钢罩内。传送带穿过通道时绕着石英棒转动，其传送速度必须十分精确，这通过一个反馈控制环路控制电动机来实现。温度的控制要求也相当严格，包含滞后作用在内典型值控制在 +3℃。图 13-36 给出了热辐射炉的简图，镍铬耐热合金电子管辐射器比钨电子管的发射温度要低。

基本的红外电子管发射器加热炉包括两个温度区域：第一个区域的工作温度约为 1200℃，峰值发射的波长为 2μm，此时，焊锡和基板被均匀的预热；第二个回流区域的温度设置在 2100℃，峰值波长为 1.2μm。这一较短的波长被焊锡所吸收却只被基板传导，这样可以使得焊锡的温度升高，基板却保持在较低的温度。然而，已经证明最有效的加热炉具有四个加热区域。热辐射回流系统通常具有三个主要的控制功能，它们是：辐射功率、曝光时间和工作场所温度。图 13-37 给出了环氧玻璃纤维基板通过四个区域涉嫌放射加热炉的温度曲线图，如果仅有一个放射系统，可能会存在阴影区域（该区域没有发自射线源的不受

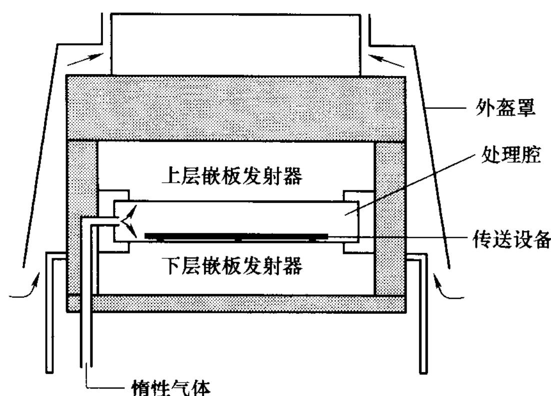


图 13-36　特别适用于表面贴装组装板焊接的炉道端视图区域

阻挡的直射波)，导致基板不能得到直接的加热。

Reithinger (1991) 阐明了在红外回流过程中电路板和元器件获得的热量并不均衡，因此，除了正确的选用发生器的类型，还需要建立适当的温度曲线。实验表明元器件被加热的速率与其重量有关。图 13-38 表明了在所有红外回流焊接系统参数为常数的情况下，不同质量的元器件达到的最高温度。

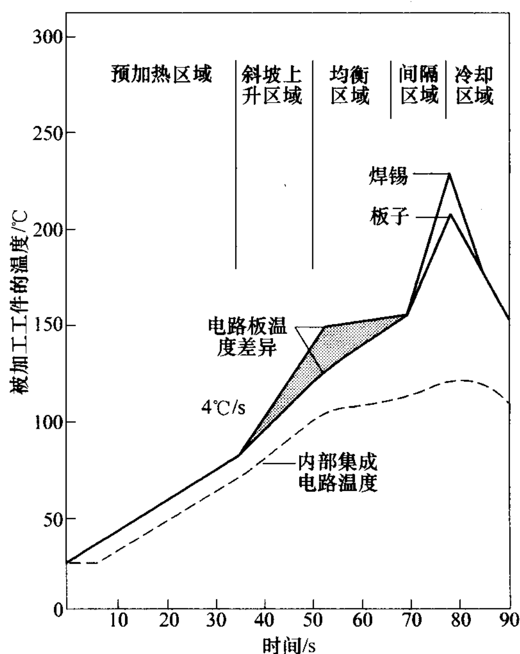


图 13-37　穿过一个四区域射线发射加热炉的被加工工件的典型温度曲线

激光焊接是热辐射的一种特殊方法，这类系统采用钇铝石榴石或二氧化碳激光来加热每一个焊接点。其主要优点是只加热元器件的引脚或焊垫而不会致使元器件本身温度升高，然而，由于其工艺过程通过编程控制，每次只能焊接一个焊接点，故其焊接速率比批量焊接系统要慢得多。

对于 SMD 电路板的焊接来说，辐射系统与强迫对流系统结合使用是最长采用的方法，有多种红外焊接设备可供选

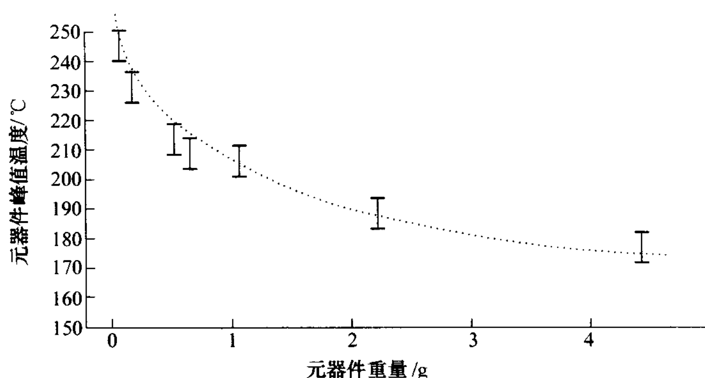


图 13-38 红外处理过程中元器件峰值温度与元器件重量的关系图
（经 Reithinger 同意，1991）

用，它们的价格和性能也各不相同。辐射系统最重要的特征是波长、所使用的辐射体、对流中所使用的氮气及其百分比。

尽管大多数的热量来自对流，但又一小部分主要来自红外辐射，两种方法的组合为表面均匀（对流）迅速（辐射）的加热提供了可能。对流系统中，加热媒介与被加热物体有直接的接触，通常是空气或氮气，通过传送带上方或下方的许多小孔将气体吹到组装板的周围，这样组装板就逐渐被均匀的加热，加热过程中所达到的最高温度和加热的速率都可以控制。元器件的引脚、终端和电路板的焊垫将同时达到焊接温度，然而，对流系统单独使用有以下几个缺点：

1）它需要较长的时间来加热电路板，因为气体的强迫流动不能太强烈，否则会使元器件的位置发生移动。

2）特别是强迫对流的热风有时会使电路板表面的焊锡膏变干并形成一层树脂层。

在这类设备中，小的其工作台顶部模型的尺寸很小，大的陈设于车间中，与回流曲线的计算机控制相适应，甚至具有可调的传送带宽度，回流曲线图由视频显示单元（VDU）所显示，并贮存于储存器中以供特殊印制电路板组装中的后续工艺使用。

13.12.5 气相系统

在气相焊接中，将化学作用不活泼的液体加热到其沸点从而在液体上方产生饱和的蒸气区域，热能由加热器转移出来，加热器又吸收饱和蒸气凝结产生的热量（Dytrych，1993a）。在该过程中，整个印制电路板被均匀的加热直到达到规定的温度，而不会被过度加热。在饱和蒸气区域规定的温度即为215℃，通

过加热化学作用不活泼的（中性的）流体达到其沸点而获得。

气相系统是一个压缩的回流焊接过程，它依靠一种高沸点液体蒸气的冷凝产生热量进行焊接。这些液体在一个槽中被加热，并在某一特定的温度沸腾。支撑在传送带上并随其而动的印制电路板穿过蒸气室，完全浸没在蒸气中或直接浸没到液体中，当组装板穿过液体媒介时，蒸气在电路板上冷凝并将热量传递到组装板和焊锡膏上。在电路板的输入区域和输出区域的上方需要提供冷却线圈。

气相系统有一个固定的温度上限，它由所使用的液体的沸点来决定，这是一种均匀加热的方法，因为蒸气/液体包围着所有的元器件，对其从不同的角度进行加热并提供与所使用焊锡膏的成分相关的目标温度。例如，对于 Sn62/Pb36/Ag2 来讲，这一目标温度为 215℃。另外，它还是一种快速的加热方法，并能够容忍给定组装板上元器件较大的质量差别。由于传热液体是化学反应不活泼的，它还可以防止焊接表面的氧化。气相系统具有下列缺陷：

1）从预热温度到焊接温度具有较快的温度上升，这可能会损坏某些元器件。

2）设备的价格较高。

3）操作花费较大，这是因为一些液体仍残留在组装好的电路板上。

4）工艺可能会受到环境的限制，因为常常使用用卤化物活化的碳氢化合物作为热传递媒介，但已知所使用的传热媒介是无毒的，且在 25℃时是稳定的。

5）需要效力强大的清洗过程，因为热量传输媒介也作为助焊剂的溶剂包含在焊锡膏中，焊接后它将大量的存在于助焊剂残留物中。

6）有些残留物会残留在元器件的下面。

气相系统主要的缺点与其在热传递过程中陡峭的上升时间有关，最初的热传递速率高达每秒钟 108 ~ 208℃，如果元器件的预加热不充分，此时由于元器件的热膨胀系数不匹配会导致元器件开裂，另一个潜在的问题是由于热质差而引起的芯吸效应，导致焊锡的加热速度快于印制电路板。上述这些缺陷已经由于在线控制的引入而得以克服，在线控制对于控制各个加热区域以获得令人满意的焊接效果是必不可少的。Linman（1990）阐述了元器件制造者建议通过在气相回流焊接工艺中加入红外预加热可以提供逐渐的加热，因此减少了焊接点的温度差，相应地减少了灯芯效应的发生。Siemens（1991）提供了批量焊接中辐射和气相系统的比较。

13.12.5.1　热把回流系统

红外回流系统存在一种“爆米花”效应，它是由于元器件被加热到 160℃以上时所吸收的湿气发生爆炸而导致元器件封装裂开的。同样，紧密引脚距的 SMD 具有精细的焊垫尺寸和空间，共勉的引脚和弯曲的引脚都可能引起焊接质

量问题，使用红外回流系统对塑料芯片载体进行焊接也会引起多种制造质量问题，所有这些问题都可以通过采用热把回流技术予以避免（Smith，1991）。

热把系统由带有元器件加热热把的拾取纺织设备组成，将元器件放置好以后，把引脚压到预先镀锡的焊垫上（不需要焊锡膏），对其施加编程控制的加热冷却循环，助焊剂涂敷器也可以和它结合在一起，每个元器件的处理时间低于10s。

该项技术使用预先电镀或回流的焊锡而不必使用焊锡膏，这是因为在回流循环中元器件放置好后被轻轻压迫，这就消除了批量回流焊接中固有的共面性问题。

在压下回流机头（该技术在再加工和维修时经常使用）之前元器件可以通过手工放置，也可以使用适当的与拾取放置装置相结合的热把焊接设备进行自动处理，如果使用后者，一个拾取/放置/焊锡加热的周期速率为每小时150~200个元器件。

目前的发展表明对流和热辐射结合使用，采用像氮气这样化学反应不活泼的气体的设备是将来选择加热系统的一个趋势。辐射可以很快的增加热量，对流对焊接点表面提供均匀的加热，采用氮气有助于减少表面氧化物的形成。

13.12.5.2 脉冲加热回流系统

随着设备小型化的发展，对于许多新的设计来讲采用柔性互连已经成为必然，包括含有柔性电路的印制电路板、含有多股柔性线路的印制电路板等。它们与各种特殊用途元器件的模块组装相结合，例如LCD显示器、送话器、扬声器等。对于这类应用，脉冲回流系统用得越来越广泛，传统的焊接设施的烙铁头维持一个预先设定的不变的温度（满足被焊接元器件高达425℃的温度），采用脉冲加热焊接，在室温条件下接触，将部件进行简单的加热（典型值为350℃），然后冷却，这样脉冲加热就几乎不会破坏被焊接的部件了。

脉冲加热回流系统使用特殊的焊接工具——热电极，它将部件压在一起，施加热量，熔化焊锡，然后保持原位不动直到焊接点冷却为止。确保所有被焊接表面的紧密接触，通过耐热元器件的电流产生的热量是热电极进行工作的两个重要因素，该系统的详细介绍由Boyd提供（1998）。

13.13 焊接后的清洗

在印制电路板的组装中焊接后的清洗是重要的步骤，它影响电路板的最终可靠性，实施焊接后的清洗是为了去除以下污染物：

1）助焊剂残留物及其衍生化合物；

2）裸板制造过程中的电镀残留物；

3）在处理和存放过程中沾到电路板上的灰尘、油类、油脂等残留物。

组装板的清洗对以下几点是必要的：

1）减小腐蚀性；

2）阻止对相邻导线间电绝缘材料的化学还原作用；

3）消除印制接头或电镀连接端子的电气接触不良；

4）减少电路板从空气中吸附灰尘的数量；

5）去除可能被真菌侵袭的物质；

6）增强电路板表面的美观程度。

13.13.1　污染物的类型

污染物主要有两类：

1）极性（离子）污染物在潮湿的条件下能够传递电流、与锈蚀发生化学反应，离子污染物典型地由电镀残留物、焊剂活化剂及与指纹相关的盐分引起。

2）非极性（非离子）污染物典型地由焊接助焊剂中的松香、乳脂、油类以及与手工操作和存放有关的灰尘和油脂等组成，它可能在接触面上形成绝缘膜。

13.13.2　溶剂和清洗方法

在最终清洗过程中使用的溶剂必须能够溶解 13.13.1 节中所述的两种污染物，而且应当与被清洗的组装板兼容。

毛刷清洗过程常用于传统的通孔引脚装配，但不适用于 SMD 的装配，因为后一种装配的助焊剂残留物可能会在元器件下面扫过甚至滞留在里面。对于喷射清洗来讲，喷射作用可以将助焊剂残留物与溶剂一起冲走，故喷射清洗适用于清洗有 SMD 的电路板。

超声波清洗方法也可以用于电路板的清洗操作，超声波能量可以分解粘接在电路板表面的助焊剂和其他残留物，超声波清洗过程所用的超声波频率通常大于 40kHz，但剧烈的超声波清洗，特别是在谐振频率处的剧烈清洗可能会破坏元器件。

用于再流焊的溶剂与用于手工焊接和波峰焊的不同，成批焊接理想的溶剂应当有如下特点：

1）能够去除极性和非极性残留物；

2）不易燃；

3）没有发生化学反应的趋势；

4）小的表面张力；

5）不影响电路板的属性；

6）低毒性；

7）低成本；

8）环保。

市面上可买到的适用于批量应用的溶剂有好几种，但清洗过程中使用的基于CFC（氟氯化碳）的产品会破坏臭氧层，致使可能会导致皮肤癌和其他疾病的有害射线穿过大气层。常用的一些溶剂有：

1）氯代烃类：像三氯乙烯（C_2HCl_3）、四氯乙烯（C_2Cl_4）或1-1-1三氯乙烷（$C_2H_3Cl_3$）等，它们溶解非极性污染物的效率很高，但毒性较大，溶解极性污染物的能力很低。

2）碳氟化合物：例如氟利昂113（$C_2F_3Cl_3$），它可以非常有效地去除非极性污染物，表面张力很小，能够渗入很小的裂缝中，但它对离子残留物的溶解能力很低且对臭氧层极具破坏性。

3）醇类：像普通酒精（C_2H_5OH）或异丙醇（2（CH_3）CH-OH），经常用来去除手工焊接后的树脂基助焊剂，它们相对便宜且毒性较低，也可以溶解极性污染物。其缺点是可燃性高、蒸气气压大，且异丙醇的毒性比普通酒精大得多。

4）水加清洁剂：像水净化方法等基于非氟氯化碳的清洗方法已越来越常用，按照蒙特利尔协定，提议到2005年所有的氟氯化碳产品、挥发性有机化合物和臭氧层损耗物将逐步被淘汰，电子制造业正开始转向使用其他不含氟氯化碳的环保型清洗替代物。

业界有五种基本的非氟氯化碳的清洗过程可以使用，它们是：半水成清洗、纯水成清洗、溶剂对溶剂清洗、全氟树脂清洗和水易混合清洗。

水成清洗（Andrus，1990）是基于氟氯化碳清洗的一种可行的替代方法，它是一种从环境角度来讲安全的、花费较小且有效的印制电路板组装的清洗方法。水是去除极性污染物的一种极好的工具，去离子的水从电路板上去除所有的污染物，由于离子极性污染物是溶解于水的，自来水和淡水也可以去除离子，但其效率比去离子水要低。非离子残留物必须用一种将皂化溶液或松香皂稀释于水而制成的清洁剂去除，这是一种浓度为1%～10%的碱性溶液。毫无疑问，对于助焊剂活化剂来讲，水是比目前使用的任何有机溶剂都好的溶剂媒介，因为它避免了在溶剂清洗方面的法律和环境方面的要求。

然而像松香等非极性残留物不溶于水，用来与松香发生反应（皂化）的清洁剂对时间和温度的要求很严格，如果温度过低或时间过短，反应可能达不到完全阶段，致使不洁的电路板不能得到清洗。而且松香皂和清洁剂必须得到完全漂洗，用去离子水进行最后的漂洗是必要的，最终漂洗完成后为了电路板快速风干必须使用高压空气鼓风机。清洗过程中需要使用带有除泡沫剂的皂化剂，因为碱性溶液往往会产生大量的泡沫。

13.14 焊接点的质量控制

焊接点在确定质量良好可靠而被接受之前需要进行检验和检查，在机器焊接中，为了使焊接生产线处于良好的运行状态，需要对焊接过程进行连续不断的监控以获取所需的反馈信息，这非常重要，目前的趋势是利用计算机帮助进行检测。

焊接点的形状通常可以表明焊接点的质量，如果其表面没有浸润焊锡，就不可能是好的焊接点。获得良好的焊接点需要做好如下几步：

1）使用正确的温度，金属进行焊接时其温度大约要比焊锡的熔点高出 30～35℃。

2）清洁并除去金属表面的氧化物。

3）使用合适的、无污染的焊锡。

4）使用正确的助焊剂以便去除氧化物，而且在焊接过程中要防止产生新的氧化物。

5）使被焊接的金属与熔化的焊锡的接触时间尽可能短。

对焊接点的测试除了视觉的检测外，还可以对焊接全过程的相关参数进行监控，对焊接点的全面评估包括许多其他的测试和过程，常用的测试有如下几种：

1. 机械测试

1）拉伸测试；

2）振动测试；

3）微小区域检测：测量分子间键的厚度，其厚度应为 1～0.5μm 之间[⊖]。

分子间键的结构由晶体组成，在更高的温度及时间的作用和影响下不断增长，缺少晶体不能提供足够的物理强度，晶体太多会减少粘接强度，因此需要建立适当的分子间键。

2. 电气功能

1）阻抗测试：该测试不是很有效，因为有时一个质量很差的焊接点也表现出很低的电阻，其差异有时是不可辨别的。

2）焦耳测试：通过为一系列的焊接点提供固定的电流而实施，根据其阻抗的不同，焊接点被加热到不同的温度。

3）X 射线检测：它常常与设备生产线相结合，例如自动光学检测（AOI），特别是对于球脚格点阵列封装（BGA）。

⊖ 原书此处有误，“1μm～0.5mm”应改为“0.5～1μm”。——译者注

13.14.1　优质焊接点

优质的焊接点表面光亮平滑，其分子间键的厚度介于0.5～1μm之间，焊接点的形状由于沾锡角较小而形成凹面，该沾锡角应当小于90°，若能小于40°就更好了。焊接点的表面应当光滑且有细微纹理，表面不应当有吹孔、破洞、异物和裂纹。SMD的放置应当精确，超过其端接部位75%的部分必须覆盖焊盘或焊垫。

13.14.2　常见的焊接缺陷

电子组装可接受性标准“IPC-A-610-C”给出了焊接点是否可以接受的基本原则，常见的焊接缺陷详述如下。

13.14.2.1　元器件放置不准确/偏移

IPC-A-610-C标准给出了各种类型的SMD不准确放置的准则，对于不同形状的元器件端接，下列标准适用（见图13-39）：

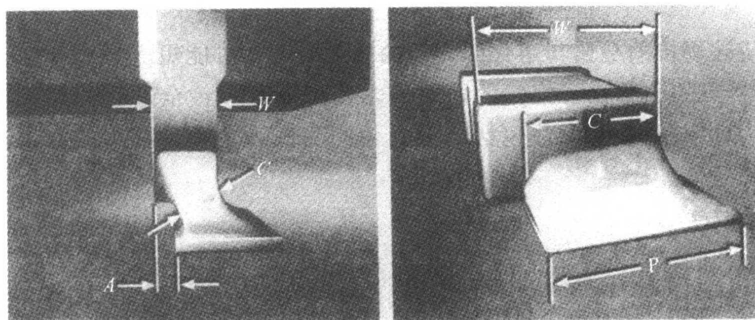


图13-39　不准确放置与偏移的可接受标准

1）如果侧面突出A超过元器件终端宽度W 25%以上或超过焊垫宽度P 25%以上，无论P小还是W小，均属于第三类缺陷。

2）如果侧面突出A超过元器件终端宽度W 50%以上或超过焊垫宽度P 50%以上，无论P小还是W小，均为一类和第二类缺陷。

综上所述可以得出结论，如果SMD的终端与焊垫的接触面积中焊锡的覆盖率小于75%就属于第三类缺陷，小于50%就属于第一类和第二类缺陷，这三类焊接点均是不可接受的。

然而，这些不准确放置的准则仅对于侧面突出A以及末端接头宽度W是有效的，对于轴向定位的侧接长度则是无效的。如果所有其他的连接参数满足要求，则任何轴向侧接长度均是可接受的，但矩形或方形的元器件末端一定不能超出焊垫。

13.14.2.2 不沾锡

当焊锡与印制电路板不能完全浸润时就称发生了不沾锡或沾锡不良，因此，印制电路板必须进行彻底的检查而不是逐个焊接点的检查。引起不沾锡的原因有很多，在波峰焊中比较典型的有：

1）被焊物体表面有油类、脂类等污染物，它们妨碍了助焊剂与物体表面的直接接触。

2）基金属缺乏焊接性。

3）助焊剂不适于被焊金属的表面。

4）焊接条件不合适，例如时间控制不恰当，在焊接操作过程中温度不合适等。

在手工焊接中，由于焊接点加热不足、缺少助焊剂、金属表面缺乏可焊接性也会发生不沾锡现象。

实际上，如果发现较多的焊接点有缺陷，例如 5% 以上，不沾锡就是一个严重的缺陷，此时需要停止生产过程。

13.14.2.3 缩锡

缩锡是指以下这种情况，熔化的焊锡完全浸润焊垫或焊盘，但由于黏着性较差，在某处形成了很薄或很厚的不规则薄膜，这意味着熔化的焊锡从已经浸润过的基金属缩回并形成了不规则的小液滴。缩锡通常是由基金属表面某种类型的污染物所引起的，例如，这些污染物可能会留在清洗研磨剂中。同样，焊锡池中的金属杂质沉积到一定程度也会导致缩锡现象。缩锡产生的另一个原因是助焊剂使用不当。只有当至少 75% 的焊垫尺寸符合焊接点标准，并且对 75% 的圆周来讲焊锡之间薄覆盖区域的角度小于 90°时（见图 13-40），缩锡才是可接受的。通过波峰焊设备对有缩锡现象的电路板进行再焊接通常并不能改善这种情况，对这类焊接点进行再加工的惟一方法是用细砂纸清除将要焊接的铜表面，然后再进行焊接。

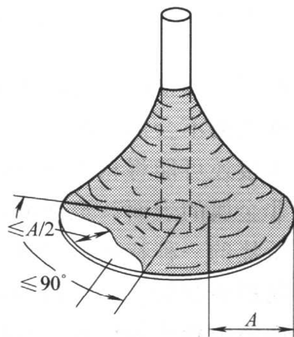


图 13-40 在焊垫的缩锡区域已经正确镀锡的情况下，可接受标准允许的最大程度的缩锡（经 Leonida 同意重绘，1989）

不沾锡和缩锡多由不正确的存储过程中的表面氧化所引起，也可能由于其他污染物的沉积以及焊锡表面上金属层间大量晶粒的生长导致焊锡后退所引起。SMD 的不沾锡也可能由于阻塞了焊锡膏网板或不适当的刮刀压力所引起。

13.14.2.4 桥接

桥接是一种短路现象，当过量的焊锡使不希望发生电气连接的两个相邻的

导体、引脚以及引脚和导体发生连接时就称为桥接，如图 13-41 所示。桥接是一种严重的缺陷，通常不被接受，除非它所短路的两个导体在印制电路板上互相有电气连接。在波峰焊接中，过低的温度和不足量的助焊剂都会引起桥接。过低的温度通常与输送带的速度、接触的时间以及预热区域的温度有关。通常，含有大面积铜或高密度接线端区域以及含有兼作散热的接线端的电路板常常会引起桥接。另外一些因素，例如在波峰焊接中波的形态以及组装板到达和离开熔融焊锡的角度对桥接的发生都有很大的影响。

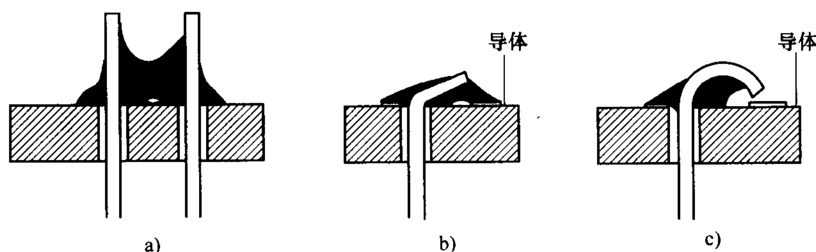


图 13-41 桥接的典型示例

a）两引脚间 b）引脚与焊垫间

c）由于不良组装引起的引脚与导体间的空隙减少

在手工焊接中，桥接或是由于部分操作者缺乏技巧或是由于使用了带有太大烙铁头的不合适的焊接工具引起的。

桥接还可能将相邻的导体和引脚连接成焊锡节点网的形式，在这个焊锡网中，非金属的表面甚至会加入进来并导致大量导体短路到一起。

桥接的一种特殊的形式为当短路时由于细小并且相对较长的称为“晶须”的焊锡所引起的，这类缺陷通常通过视觉检测较难发现，这是由于它通常出现在板面空隙较小的地方，有时这就需要修正电路板的设计。

13.14.2.5 受扰焊接点

受扰焊接点经常被称作“冷焊接点”，这是因为在手工焊接中，它通常是由于加热不足造成的。在焊锡凝固过程中的任何移动都会导致“受扰焊接点”的出现，这会引起焊接点出现不规则的表面，至少是部分地出现不平整和褶皱，冷焊接点有时也表现为焊接点本身有裂缝。如果冷焊接点为一个连续出现的问题，则它可能是由于在焊接机工作时电路板的振动引起的，或是由于传送机的不良工作引起的。这些问题可以通过在焊接点凝固过程中提供平稳的印制电路板传送机来轻松的纠正，另外，应当检测焊接点凝固过程中传送机的振动以及像吹起等引起焊锡移动的情况。需要记住的是冷焊接点会使人们无法确定焊接点的完整性，故这类焊接点需要进行重新加工。

13.14.2.6　分层/起泡/白点

分层、起泡和“白点”是由于在温度高于 T_G 值的情况下，基板过多的暴露于高热条件件下，可能还伴有残存的湿气以及某些应力，现简要叙述如下。

1）分层：这意味着基板相邻的层之间发生分离或铜箔与树脂之间发生分离。相邻的层之间发生分离通常发生在电路板的边缘或孔洞的周围，电路板分层通常是绝对不可接受的。

2）起泡：这是一种发生在基板上相邻的层或基材与铜箔间的仅仅是局部的鼓胀或分离。它看起来像是基板间有气泡，如果起泡部位远离镀通孔、缺陷部位是非导电的并且内层没有导体受到影响，则起泡通常是可以接受的。

3）白点：这是一种发生在基材基板内部的情况，基材上的玻璃纤维在玻璃纤维织网交叉处与树脂发生分离，它看起来像基板内部一个个独立的小白点或小十字，这是由于玻璃纤维细丝发生分离而产生的现象。如果这种现象仅仅发生在有限的区域并且所有的白点仍然为树脂所覆盖，则这种电路板还是可以接受的，需要强调的是玻璃纤维一定不能暴露在基板的表面外。

如果白点不是单个出现的，在这种条件下基材表面下的白点或十字连接在一起，这类基板缺陷称为“白斑”，它通常与机械诱导应力有关。

以上提到的几种缺陷出现的原因或是由于在焊接（包括硬化）过程中过度暴露在高温条件下，或是由于基板温度超过了玻璃传输温度 T_G 值造成的。T_G 值是对玻璃纤维胶片材料而言的，通常为 135℃。

在镀通孔电路板中，必须保证所有镀通孔中的焊锡完全浸润孔壁并高出镀通孔，在镀通孔中不允许出现不沾锡或暴露基材的现象，如果达不到该要求，则此焊接点是有缺陷的。

如果通孔垂直填充的部分超过 75%，就可以认为通孔是填充的，包括电路板的正面和背面最多可以允许 25% 的通孔镀面下陷，图 13-42 给出了镀通孔的这种情况。

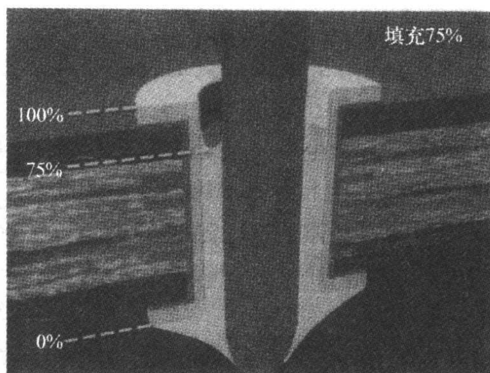


图 13-42　通孔垂直填充的可接受性标准

如果通孔的垂直填充有问题，则与孔壁相关的接触角就需要进行检查，如果该接触角大于 90°，则该印制电路板裸板就不符合标准而必须被拒绝。

13.14.2.7　元器件体上的填锡扩展

填锡的高度有时可能会超出元器件的终端引脚，但必须保证填锡不能达到接触元器件体的高度。

13.14.2.8　吹气/吹孔/针孔

吹孔是焊接点填锡处一个球形的较深的孔洞，当电路板中间留有潮气或助焊剂时，焊接时热的焊锡使其蒸气化，在焊接点冷却过程中通过焊接点吹出就形成了吹孔。如果吹孔是由于内部气体通过填锡释放出来而形成的，该缺陷就用术语吹气表示。这一问题可以通过烘烤或增加预热要素加以缓解，但预热区域的温度和烘烤温度（100～110℃）必须小于基板的 T_C 值。

过多的助焊剂或湿气蒸气化不足以及在焊接前助焊剂熔解，均会增加吹孔和焊接点内部的孔隙率。

湿气来自储存过程中电路板从空气中吸收的水蒸汽，测试已经表明即使经过 24h 的烘烤，当暴露在较高的相对湿度条件下，电路板中湿气的含量会再次剧烈的增加，正因为这样，此类电路板应当尽快的进行焊接。

焊接点填锡处非常小的吹孔称为“针孔”。

镀通孔电路板上吹孔形成的原因有以下几个方面：

1）与引脚的直径相比通孔的直径太大；

2）元器件插入方式不正确；

3）像油墨、光阻剂、防焊膜等在加热条件下易于蒸气化的有机物残留；

4）通孔壁上的镀层吸收湿气以及其他液体；

5）助焊剂使用过量；

6）预热区域的热温度曲线不是最佳的；

7）填锡固化冷却太快。

图 13-43 给出了焊接点的几种吹孔缺陷。

吹孔通常发生在焊接面，这是因为当焊锡沿着通孔上升时焊锡的冷却固化从顶端开始。气体逃逸时通过最小阻抗的路径，该路径通常在焊锡面，因为这里的焊锡较热。

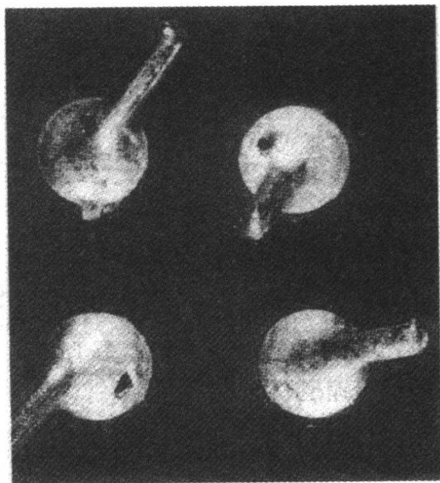


图 13-43　吹孔

注：在焊接点形成过程中由于焊接点内部截留有液体或水蒸汽而形成的缺陷。

13.14.2.9　最小面连接点长度

用于焊接的整个内填圆角（焊脚）应当沿着引脚的总长度进行沾锡，如果面连接点长度 D 小于引脚宽度，则焊接点是不可接受的。引脚宽度的衡量从焊迹最前端到弯曲根部的中点，如图 13-44 所示。最小面连接点长度 D 至少应当等于引脚宽度或引脚长度的 75%，

无论二者中哪一个较小，此时焊接点都是可以接受的。

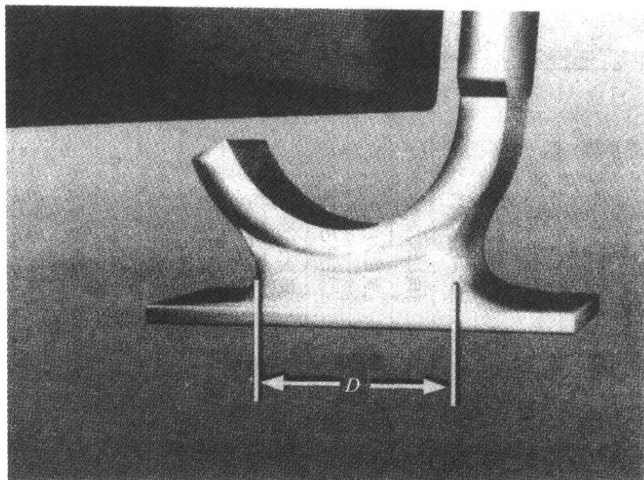


图 13-44　最小面连接点长度

注：如果 D 小于引脚宽度或 0.5mm，无论哪一个较小，焊接点都是不可接受的。

13.14.2.10　锡球/溅锡

锡球/溅锡通常是由于印制电路板焊锡阻剂不完全硬化、没有防焊膜以及基板的树脂没有完全硬化引起的，但当电路板进行再次焊接时该缺陷常常会消失。焊锡池中含有不溶性污染物、使用不适当的助焊剂引起的飞溅、工作区域不清洁都有可能引起这类缺陷。

在印制电路板组装中不应当出现锡球。

如果溅锡没有留住或没有防护性薄膜包着且粘接力较低，则溅锡可能会飞出，导致不稳定的短路。

13.14.3　焊接点缺陷及其常见成因

在焊接板上可以看到大量的缺陷，表 13-4 给出了焊接板最常见的故障检修汇总表。

Samsami（1990a）归纳了各种紧密引脚间距的焊接缺陷，经常遇到的组装缺陷如图 13-45 所示。

全世界有许多工具可供手工焊接和修理工作使用，其中一些非常好用，另一些则不是很适合现代电子元器件的再加工。关于焊接工具的一个很实用的网址是 www.ersa.com，它提供了焊接工具和检测部门的很多信息。对于现代电子装配来说，像微控制焊接台等解焊系统、SMD 焊接和修理系统、球栅阵列组件

安放和再加工系统、光学检测系统、质量保证和过程控制软件都可以从 M/s ERSA 处获得。

表 13-4 常见的焊接点缺陷及其成因（经 Braun 同意，2003）

故障现象 \ 故障成因	不正确的贮存污染焊接表面	手印污染焊接表面	其他污染物沾染焊接表面	焊接温度过低	焊接温度过高	温度施用不均匀	拖送速度太慢	拖送速度太快	预热温度过低	预热温度过高	助焊剂不足或污染	使用助焊剂过少	使用助焊剂过量	焊接点凝固过程中拖送振动	焊锡波不稳定	焊锡污染	电路板固定不当
桥接/毛刺				✓				✓	✓		✓	✓			✓	✓	
分层/起泡					✓		✓			✓							
受扰焊接点/冷焊接点				✓				✓	✓					✓		✓	
焊流不足				✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
不沾锡/缩锡	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓	✓			✓	✓	✓
吹气/吹孔				✓	✓			✓	✓				✓		✓		✓
焊锡球/溅锡			✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓					✓	
墓碑效应/起翘器件					✓	✓								✓	✓		✓
板翘/板扭					✓	✓	✓			✓							✓

当然，每个人都需要根据价格、性能和服务选择最适合自己的工具，以便更好的满足需求。

要学会辨别优质焊接点和劣质焊接点需要经验，且必须牢记以下几点：

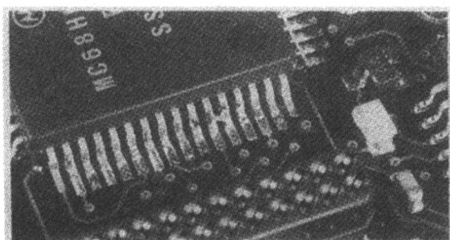
1）焊锡应当均匀地分布在元器件和基金属上，所有的焊接点，特别是高电压电路中的焊接点应当有光滑的表面，在高电压下任何突起都可能会引起火花放电。

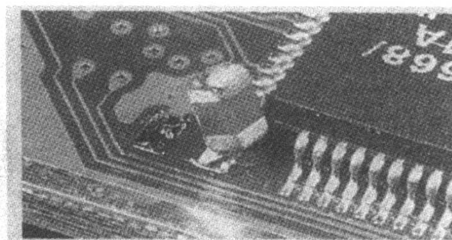
2）焊接点的数量不能太多，不然会使元器件的形状不明显。

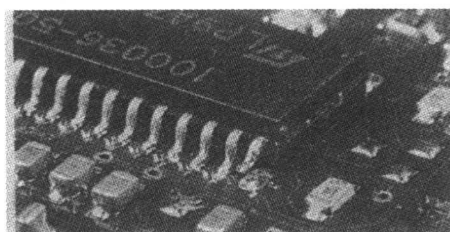
3）焊接点的表面不应该有助焊剂或氧化物等残留物。

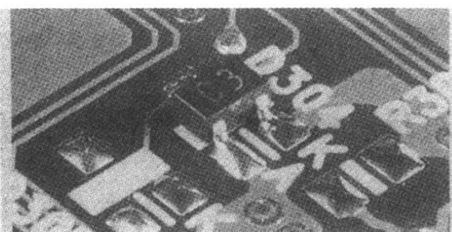
4）焊接点不应该接触到防护金属丝。

良好的焊接点应当很光亮，不应当是灰暗的或粒状的，如果焊接的结果不够理想，应对焊接点重新加热并加入少量新的焊锡以帮助其回流。劣质焊接点的几个例子如图 13-46 所示。


a)

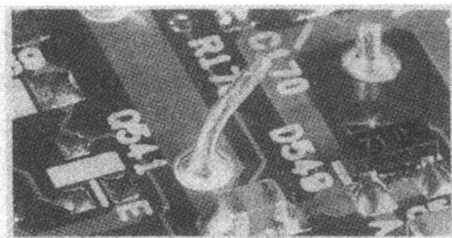

b)

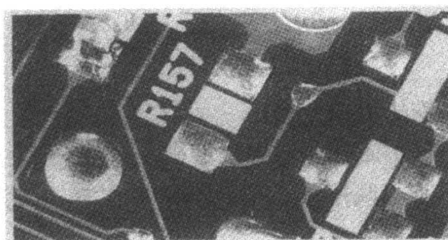

c)



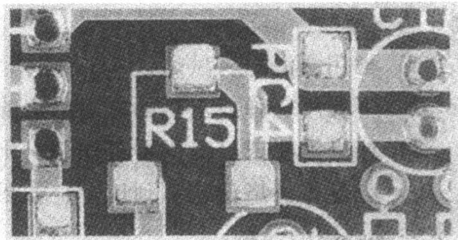
d)


e)


f)



g)



h)

图 13-45　组装缺陷的常见类型（经 Samsami 同意，1990b）

a）焊锡桥接　b）元器件发生墓碑效应　c）引脚浮起　d）焊锡不足
e）元器件偏移　f）引脚未剪短　g）元器件缺失　h）焊锡膏偏移

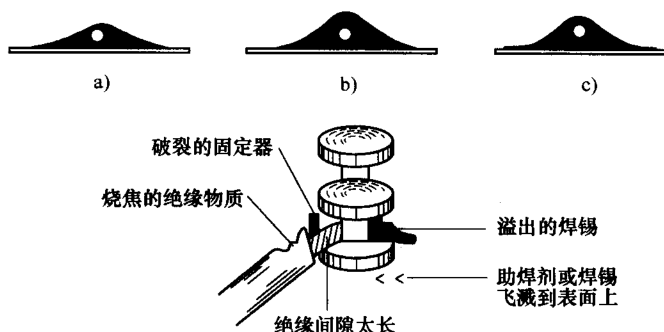


图 13-46　不良焊接示例
a）焊锡太少　b）焊锡太多　c）适量焊锡

13.15　健康和安全方面的问题

1）不要在焊接工作台上吃东西，因为所使用的焊锡丝中含铅，对人体是有害的，焊接过程中焊锡上的一些铅会沾到手上，然后又会沾到所食用的食品上。由于铅有毒，焊接后一定要正确地洗净双手。

2）用抹布或刷子将工作台上的灰尘、油脂、泼溅的焊锡等清理干净，清理工作台过程中不戴手套进行擦拭时，工作台可能会擦伤手掌。

3）在手工焊接过程中，释放的烟气中不含铅，因为铅在手工焊接这种相对低温条件下不能被蒸发，但有些人对焊接过程中释放的助焊剂的烟气过敏，通常应使用抽风机吸走这些烟气。

4）熔化的焊锡很容易导致皮肤灼伤，也可能对眼睛造成严重伤害。

5）烙铁头会烧伤皮肤，烧焦各种材料，所以烙铁头在不使用时要将其放到敞开的支架中。

6）常用湿海绵擦拭烙铁头。

7）不要用轻弹或击打的方法来去除烙铁头上的焊锡。

8）如果需要或已提供了工作服，则应保护工作服不要被磨破。

9）应避免将烙铁跌落到地上，如果不小心跌落了，不要试图接住它，因为常常会碰到烫的一端。

10）主电源必须接地，要经常检查接地线是否良好以防止发生电击危险。

如果在焊接或脱焊操作过程中不小心被烧伤，则需要采取以下急救措施：

1）立刻用自来水或冰冷却受伤的部位 10～15min。

2）在肿胀开始前摘取戒指等饰物。

3）进行消毒清洗，防止感染。

4）不要涂各类洗液或药膏。

5）不要刺破随后形成的水泡。

6）寻求所需的专业治疗建议。

需要注意的是焊接和脱焊工作应当仔细地完成以避免可能发生的电击和灼伤。为了避免电击，在移取或更换元器件及组装之前需要断开要维修的设备与交流电源之间的连接。定期地检查接地线、烙铁手柄和烙铁电线的绝缘状态是一个良好的习惯。在拔掉电源断电时，地线接线柱必须在最后断开。

13.16　静电放电控制

当两个具有不同电压或不同电荷极性的导体相互靠近或接触时，电荷应迅速地由一个物体转移到另一个物体上，这种由一个物体到另一个物体的电的突然转移或释放就称为静电放电（ESD）。

目前静电放电是电子工业中面临的最严重的问题之一，许多电子元器件都可能由于人体或外物引起的普通的静电放电而损坏。

越来越多的静电敏感元器件不断出现在现代电子市场上。电压值正在迅速地下降，导致元器件因 ESD 而失效。就在几十年前，普通人关心的静电放电还仅仅与雷暴以及人们如何通过使用闪电避雷针正确的接地来提高建筑的安全性有关。但目前在处理如下静电敏感元器件时需要遵守大量的静电放电预防措施，这些元器件包括 COMS、EPROM、MOSFET、激光器二极管、VHSIC（甚高速集成电路）、混合电路、薄膜电阻、精确电压调整二极管以及频率响应大于 1GHz 的检波器二极管、声表面波（SAW）器件或 VMOS。静电放电电压可能会引起灾难性的故障，导致金属熔化、连接点故障或氧化物故障，更为严重的是它还会使部分元器件性能退化，这类元器件虽然还能完成预定的功能，但出现许多更难被识别的“潜在故障”，这些“潜在故障”导致元器件的工作寿命急剧下降。采用目前技术的器件的潜在缺陷极难被检测出来，特别是当其已经安装到制成品中以后更是如此，以致组装板常常会通过检验而到达顾客的手中，导致顾客使用后对产品不满意。另一方面，正确的静电放电控制有助于提高产品质量，减少损失并保证用户更高的满意度，因此现代电子设备装配线都置于装有空气调节设备的房间中并进行湿度控制，安装空气离子发生器、静电消散地板以及工作台面。只有所有的工作人员都理解静电放电控制的基本概念并身体力行，所有这些静电放电控制措施才会有效。

13.16.1　静电放电的基本原理

所有的物质都有静电放电的能力，物体上的电荷被称为静电荷这象征性地

意味着这些电荷只是停留在物体上，条件适合时会发生转移。所产生的静电荷量有赖于物体的材料、接触面积、分离的速度以及相对湿度，相对湿度高则产生的电荷就少。两个具有不同电压大小和极性的导体靠近到一起或相互接触时，其上的电荷会很快地从一个物体转移到另一个物体。与静电荷相关的几个术语定义如下：

静电荷的多少用库仑来衡量，物体上 1C 的电荷量等于该物体上 1F 的电容量与 1V 的电压的乘积。

1 库仑 = 1 法拉 × 1 伏特；即

1C = 1F × 1V；或

1C = 1As

式中，A 代表安培，s 代表秒。随着电子伏特的引出，若一个电子穿过的电压为 1V，则其获得的能量为

$$1\text{eV} = 1.602\times10^{-19}\text{C}\times1\text{V} = 1.602\times10^{-19}\text{As}\times1\text{V}$$
$$= 1.602\times10^{-19}\text{Ws} = 1.602\times10^{-19}\text{J}\ (\text{焦耳})$$

另外，电场中两点之间的电位差定义为将单位正电荷从一点移动到另一点所作的功，这意味着

电位差 = 所作的功除以电荷传递的电量

$$1\text{V} = 1\text{J}/1\text{C} = \text{AsV}/\text{As} = 1\text{V}$$

如果将 1C 的电荷从一点移到另一点所作的功是 1J，则称这两点间的电位差为 1V。

13.16.2 各种操作产生的静电压

有时在脱衣服的时候会有噼啪作响并发出火花的现象，当穿过合成地毯而后触摸门把手时有时候会有电击的感觉，这些都是静电放电的例子。在这不到 1s 的时间里所感受到的电压从 2000（大多数人能感觉出来的最低电压）~25000V 不等。

人体像其他物体一样很容易积累静电荷，皮肤就可以相对的储存大量的电荷，各种操作产生的电压如表 13-5 所示。不同的相对湿度产生不同的静电电压，较高的相对湿度有时是有益的，因为此时产生的静电电压较低，但由于其他一些重要因素，相对湿度高于 65% 是不可取的。

表 13-5　各种操作引起的静电电压及其与相对湿度的关系

工作方式	在给定相对湿度范围下的电压值/V	
	10% ~20%	70% ~90%
在合成地毯上行走	35000	1500

（续）

工　作　方　式	在给定相对湿度范围下的电压值/V	
	10%～20%	70%～90%
从印制电路板上撕下绝缘胶带	12000	1500
用橡皮擦清洁印制电路板	12000	1000
将氟利昂喷洒于电路板表面	15000	5000
从工作台上拿起塑料袋	20000	1200
坐在泡沫垫子上	18000	1500

13.16.3　各种元器件对静电放电电压的灵敏度

静电放电事件对静电放电灵敏元器件的破坏由元器件消散放电能量的能力及其耐受所产生电流大小的能力决定，这定义为元器件的“静电放电灵敏度”或“静电放电敏感性”。

市场上大量出现的集成电路使电子设备设计的越来越小巧，运行速度更高更快，元器件内部的导电路径急剧减小，如此微小的电路通路很可能被小的静电放电电压所烧毁或破坏。

表 13-6 给出了各种类型的元器件与其相应的静电放电损坏电压之间的关系，需要注意的是人体所能感受到的最小静电放电电压为 2000V。

表 13-6　各种器件类型与静电放电灵敏度之间的关系

器件类型	静电放电灵敏度/V
VMOS	30～1800
MOSFET	100～200
EPROM	100～2500
CMOS	250～3000
TTL	300～2500
薄膜电阻	300～3000
SCR	680～1000

应使用不同的模型和测试程序来对元器件的静电放电灵敏度进行表征、确定和分类。

静电敏感元器件应当进行分类，以便于提醒可能的元器件用户在元器件所需的一个合适的受控环境中使用。

为了查明某一特殊元器件的分类，第一个信息来源是元器件自身的生产商或供货商，另一个来源是 ITT（美国国际电话电报公司）的研究机构/纽约的可

靠性分析中心，是它公布了22000种元器件的静电放电敏感性数据资料，其中包括微电子电路。

13.16.4 静电防护

甚至有些已经焊接到印制电路板上的敏感元器件，也可能由于静电放电而将电荷通过导电图形传到静电放电敏感元器件中而导致其损坏。损坏或破坏所需的电压值随着元器件的不同而不同，但由于元器件越来越复杂，其对静电放电的灵敏度也随之增加，就像本书7.2.2节中所看到的一样。关于静电放电所应学到的最重要的一点就是人类本身就是静电放电控制最重要的一部分。

13.16.5 抗静电工作台

抗静电工作台通常放置在一个静电放电安全的工作区域，多数工作台都包括的静电放电控制最关键的因素有：

1）静电消散工作台表面；

2）工作人员的接地手段（通常通过腕带接地）；

3）公共接地；

4）配备静电放电防护垫；

5）适当的标志和标签。

静电放电控制最重要的需求是提供一条接地路径，使需要实施静电保护的物体与操作人员处于同一个电位。该环境中所有的导体，包括操作人员，必须连接在一起或电气上连接在一起并连接到已知地上，即在所有物体及人体间创造一个等电位的平衡。

静电放电联合标准ANSIEOS/ESD6.1-接地，对于静电放电保护设备推荐以下两个接地程序：

1）将工作区域（工作表面、人体、设备等）所有的元器件接到同一个电气地“公共接地点”上，使其有共同的电压。这种静电放电公共接地点应当标识出来，静电放电联合标准EOS/ESD S8.1-1993推荐使用如图13-47所示的标志。

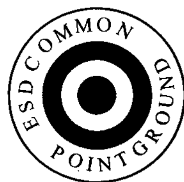


图13-47 静电放电公共接地点标志

2）将公共接地点连接到设备地（电气接地），这是首选的接地，因为工作台上所有的电气设备已经接到了这个地上，连接静电放电控制材料或设备到设备地，这样就可以使工作台上所有的元器件处于同一电压了。

如果用来修复静电放电灵敏元器件的烙铁连接在辅助地（水管、建筑物框架、地桩）上，静电放电敏感元器件连接在电气地上，工作台的表面包含静电放电灵敏元器件，则在烙铁和静电放电灵敏元器件之间有一个电位差，该电位

差可能对元器件产生破坏。任何用到的辅助地和工作台必须连接到设备地上以减小两个地之间的电位差。

13.16.6　适当的装配环境

采取下列步骤可确保一个适当的装配环境：

1）规定静电放电安全区域：规定特殊的静电保护区域在其间处理灵敏部件，需要静电保护防护的典型区域包括：接收检查区域、仓库、装配线、测试区域、包装分配区域、现场勤务检修区域及清洗车间。

2）创造一个“无尘环境”：与清洗车间的“等级 10000”条件相类似，该环境中存在的大于 0.5μm 的粒子不能超过 3500000 个。

3）控制相对湿度：将相对湿度控制在 60% 左右。穿在常常产生静电的普通衣服外面的导电工作服可以将电荷泄放到地上，如果没有导电工作服，应当穿棉质的衣服而不要穿毛质或合成纤维质地的衣物。如果相对湿度低于 30%，一些抗静电材料会变得无效。静电放电控制最好的解决方法就是消除产生和带有静电荷的物质。

4）使用空气离子发生器：安装空气离子发生器，将离子化的空气吹到工作区域，用它来中和没有连接到地的非导体上的正电荷与负电荷。接地并不能去除塑料和其他绝缘材料上的静电荷，因为不能形成导电通路，而离子化工程产生的正电荷与负电荷可以被吸引到带有电荷的物体表面，并将物体上的电荷有效地中和。

5）包装敏感元器件：使用正确的导电材料进行包装可以有效地对产品进行电荷防护，也可以减少由于包装袋内部的产品移动而产生的电荷。由厂家提供的产品在递送过程中必须装在密封的导电容器中，该容器可以消除产生的电荷（Grant，1990）。

6）使用静电消散地板和静电消散工作表面：静电消散材料的电阻介于导体和绝缘体材料之间，这意味着其阻值范围为 10kΩ ~ 100GΩ。这样，消散材料的表面上就会有电子流动，但它由静电消散材料的电阻率控制。当然，与在绝缘体或导体上一样，静电消散材料上也会由于摩擦而产生电荷，与导体材料类似，静电消散材料可以使电荷以一种可以控制的方式传递到地。抗静电地板材料在有大量人员活动的区域是必不可少的，另外，这种地板材料可以减少椅子、手推车等滑过地板时产生的电荷积累，但这些东西需要由导电的小脚轮（紧贴在地板上附加的小轮子）和地板进行电气连接。包括人体、鞋类以及地板等到地的电阻必须小于 35MΩ。

7）为静电放电灵敏元器件贴标签：静电放电敏感的元器件、装配以及成品应当贴上静电放电敏感标志这一标签。静电放电敏感标志包括一个三角形、一

只伸过来的手和穿过这只手的一条斜线。三角形意味着“警告”，穿过伸出手掌的斜线表示“禁止触摸”。该标志可以用于静电放电敏感的集成电路、电路板及其装配，它表示在不采取正确预防措施的情况下，处理或使用以上这些东西可能会由于静电放电而造成破坏。

8）使用静电放电保护材料：垫子、椅子、腕带、工作服、包装以及其他提供静电放电防护的物品。这些材料上应显示静电放电防护标志。

静电放电防护标志包括位于三角形内的一只伸出的手，围绕着三角形有一条圆弧，用它表示防护，以及替代了静电放电敏感标志中的斜线。该标志可以用于如手工工具、传送带及自动处理机等专门设计和修改以提供静电放电控制的设备。

以上两种标志均不用于静电放电测试设备、鞋类测试器、腕带测试器、电阻表、电阻率计或类似的只用于静电放电却不提供真正防护的设备。

另外还要做到：

1）将所有不必要的元器件从装配车间移走。

2）消除所有材料产生和带有的静电荷。

3）确保使用清洁的工作台。

4）使用经过训练的劳动力，并穿着棉布衣服，佩戴腕带和踵带，避免主动产生电荷。

13.16.7　元器件的处理

在进行元器件的处理时应当遵守以下预防措施：

1）操作像集成电路等元器件时一定只能接触元器件体的非导体部分，而不能接触其引脚，对静电放电敏感元器件来说，其引脚是最容易导电的部分。

2）只能接触印制电路板的边缘，而不能接触焊接点及元器件面，因为导体能够导电致使其与静电敏感元器件相连接。

3）如果有可能，应当将所有的导电材料从工作区域清除，因为电场使电荷分布在静电放电灵敏元器件中，如果有导电材料暴露在电场中，一旦静电放电敏感元器件与其相接触，元器件就会被损坏。

4）如果静电产生材料对于所进行的工作是必不可少的，则应当合理安排工作台使静电敏感的电路板距离产生静电的材料不小于30cm。

5）建议使用供站姿操作的防静电鞋与坐姿操作使用的防静电腕带，每隔一段特定的时间应当对防静电腕带和防静电鞋进行检查，以确保其正常工作，这一点非常重要。

① 腕带：腕带供人们坐在工作台旁使用，是进行静电放电控制非常有效的工具，它可以很贴身的佩戴在裸露的皮肤上，通过一个1MΩ（在250V的工作

电压下其功率为 0.25W）的限流电阻安全地接到公共接地点上，并具有快速连接和断开的装置。限流电阻使电荷缓慢的以可控制的形式释放到地，以限制电流大小防止被破坏。

为了测试腕带，用另一只手按住测试按钮，晃动手腕以检查间歇故障，应当注意，当检测腕带时不要站在金属板上。

② 鞋类接地装置或踵带：它们用来将人体通过袜子与导电地板或垫子相连接，对于站姿操作来讲鞋类接地装置非常有效，它避免了使用腕带时从腕带处接出的很长的导线，若采用坐姿操作，鞋类接地装置的效果就不是很好了，因为人们在操作时可能会抬起脚，导致其与导电地板断开接触。

当测试鞋类接地装置时，将系有踵带的一只脚放到金属板上，用与其相对的另一只手去按测试按钮。必须分别对每只脚的接地装置分别进行测试，若同时测试两只脚，则只能在两只鞋类接地装置同时发生故障时才能检测出来。

操作时没有必要脱去袜子，因为袜子的湿度足以提供其与外部环境的电气连接。

13.16.8　处理 MOS 器件时需要考虑的一些特殊事项

MOS（金属氧化物半导体）器件是高灵敏度的器件，过电压、电压峰值以及静电放电很容易导致其损坏。人体积累的静电荷可导致高达 25000V 的电压，这些积累的电荷会很快地泄放到进行电气接地的器件或元件体上，在很大程度上会破坏某些电子元器件。生成的高电压脉冲会烧毁集成电路器件的输入端，这种破坏可能不会即刻显现出来，它会随着时间的推移逐渐积累而导致器件实效。

几个引起静电放电的最常见的因素有：人体的运动、低的湿度（高热和干燥条件下）、不正确的接地、无屏蔽的电缆、不良的连接以及机器设备的运动等。当人体运动时，所穿的衣服互相摩擦会产生电压超过 1000V 的大量的静电荷，电子设备中的电动机，例如真空吸尘器或电冰箱等，会产生高能级的静电放电，静电放电也有可能发生在低湿度的环境下，例如湿度低于 50%。电荷积累到 10000V 左右时就很容易对接地的金属部件放电了。

需要牢记的重要的一点是 10000 ~ 25000V 的静电放电对人体是无害的，然而由供电电源产生的 230V，1A 的电流却是致命的，其原因是电压引起的电流的传输能力不同。静电放电的电压值在数千伏的范围内变化，但它引起的电流只是微安级，对人体是无害的，而如果将手指与 CMOS 器件的引脚相接触，人体所带静电的水平足以破坏 CMOS 器件的输入端。

在存储、处理或焊接 MOS 器件时，需要特别注意。当使用这类器件时必须遵守下列预防措施：

1）在存储和运输 MOS 器件时，使用由导电材料制成的或特制的集成电路容器会使得它们或者将 MOS 器件所有的引脚短路或者将其与外部接触物隔绝。

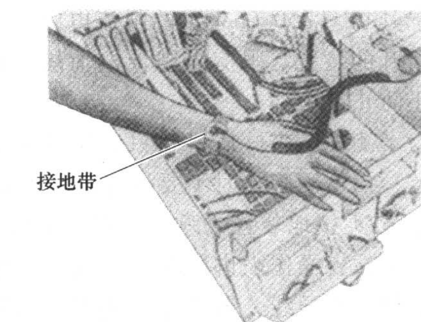


图 13-48 使用抗静电带

2）处理 MOS 器件的操作人员应当使用如图 13-48 所示的接地带将人体接地，这些抗静电设备可以通过绕在技师的手腕或脚踝上以使其正在操作的系统接地。这些接地的带子将操作技师身体上积累的静电荷释放掉，将其无害地传递到地。

3）当操作高电压设备，例如监视器或供电单元时，一定不能佩戴抗静电带。一些技术人员将铜丝缠绕在腕部或脚踝上，铜丝的另一端接地，这是不安全的操作，因为这会导致真正的腕带失去抵抗性能。

4）在工作区域如果有抗静电垫就更好了，如图 13-49 所示。抗静电垫由橡胶或其他抗静电材料制成，操作设备时工作人员可以站在上面。当在铺有地毯的区域工作时使用抗静电垫会更有用，因为地毯是静电放电的一个主要来源，一些抗静电垫带有接地线，应将其连接到交流电源插座的安全地线上。

5）在接触设备内部的元器件以前，特别是含有 MOS 器件的设备，应当用手触摸一下机壳的暴露部分或供电机架，通过这种方式使身上的静电转移到大地。但这种技巧只有在电源线连接到电源插座的地线时才会起作用。

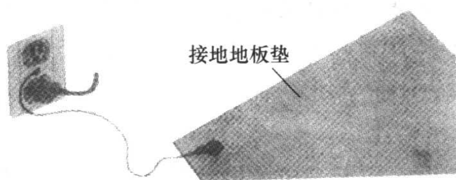


图 13-49 在工作区域使用抗静电地板垫

6）在安装了所有其他元器件以后再在印制电路板上安装 MOS 器件。

7）更换有缺陷的集成电路时，使用烙铁头接地的焊接烙铁拔出缺陷集成电路，并将新的集成电路焊接好。

8）将 MOS 器件安装到电路板上以后，应当遵守正确的操作预防措施，为防止静电荷经由印制线传递到 MOS 器件，推荐将印制电路板的接线端接上导电夹子或导电胶带。

9）为防止由于瞬间电压造成的永久破坏，在接通电源的情况下应避免从测试插座上插拔 MOS 器件。

10）应尽可能地避免电压波动，小心继电器、电器设备开关等造成的电压波动。

11）当 MOS 器件的供电电源关闭时，信号不应输送到输入引脚上。

12）所有不使用的引脚应当连接到地或供电电源上。

13）建议处理 MOS 器件的工作人员穿着抗静电服，特别应当避免穿合成纤维服装。

14）在电源接通的情况下不能将印制电路板插到连接器的插槽中。

15）工作台应当具有非导体台面、非导体的托盘、接地的烙铁等。

一些焊接工具输出控制的开关动作会产生电压峰值，它会扩大对 MOS 器件产生有害的影响，故选择烙铁时应当注意选择低电压峰值的烙铁。

13.16.9　静电放电控制的教育培训/证书

处理静电放电敏感元器件的工程师、技师以及操作人员，无论是从事输入检测、仓库及成套元器件的储存、组装或测试操作以及故障检修等，都需要有安全处理静电放电敏感元器件的基本知识。

IPC（www. ipc. org）已经开发出了“IPC-VT-54”录像带，其上提供了关于静电控制的全套课程，IPC 训练录像带的设计可以帮助建立容易接受的高效的学习环境，它由行业专家开发，并提供评估测试。

罗马和纽约的静电放电协会提供静电放电领域的常识、解决方案、标准以及相关教学工作，相关资料可通过 www. esda. org 在线获得。

13.17　印制电路板的再加工和修理

当印制电路板进行检查和测试时，无论是裸板还是满负荷的组装板，一旦发现缺陷，就需要评估有成本效益的维修方法，同时为用户提供与原始产品具有同样可靠性的产品。对于只有少数几个有缺陷的简单电路板，对其进行再加工通常是不经济的。然而许多电路板具有很高的复杂度，满负荷的组装板可能价格很高，此时对不合格的产品进行再加工使其通过测试就会较为经济。

通常不对裸板进行修理，因为这会给今后的组装使用带来可靠性风险，况且与组装板比起来，裸板的价格也相对较低。综合以上几个因素，在高可靠性和军事应用中，不允许对裸板进行维修和再加工，裸板的再加工只能用于商用。但板子的维修必须符合原始设计要求，符合期望的可靠性和质量标准。

另外，有些使用过的电路板需要进行维修和再加工，多数情况下，需要移除原有的元器件并更换一个新的元器件，这种操作通常需要手工进行。对于使用镀通孔的板子，维修工作可以通过像焊接烙铁和起毛细作用的编线等这类简

单的工具来完成。另一方面，对于SMD，需要使用特殊的再加工工作台，这依赖于热风回流焊接设备。在修理过程中，需要使用大量的化学品，特别是在清洗、湿气排除、助焊剂去除、润滑剂擦拭、冷冻喷雾以定位热敏感元器件等过程中。

13.17.1　元器件的测试方法

多数设计者都会在电路板上方便的地方提供测试点，这些测试点通过一些特殊的直流电压和交流电压以及相应的波形来定义。图13-50给出了将要出现在电路板上的测试点，它通常是一个垂直固定的直杆以供测试棒连接。

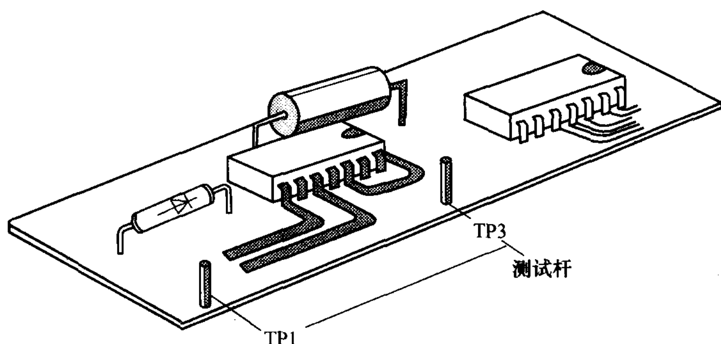


图13-50　印制电路板典型测试点

如果没有提供特殊的测试点，可以通过与电路板上元器件的各点相连来完成测试，此时可按照如下步骤进行：

1）对于晶体管，将测试棒与管壳下的引脚相连接。

2）为读取印制电路板印制线上的信号，可利用与印制线相连接的元器件，如图13-51所示，将测试引线夹到与印制线相连接的元器件引脚上。

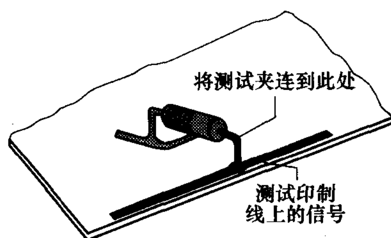


图13-51　将测试棒与元器件相连来对印制线进行测试

3）采用集成电路测试夹与集成电路相连接可以很方便的对集成电路进行测试，具体说明如图13-52所示。测试时应注意不要同时接触多个导体引脚，否则很容易造成短路，由于电路板上的数字电路通常采用紧密引脚距封装，故测试时应使用尽可能细的测试棒。

4）带有连接器的柔性扁平排线常常可以提供良好的位置以便进行测试读数，为了免受损坏通常将连接器引脚本身封装起来，但进行测试时可以与连接

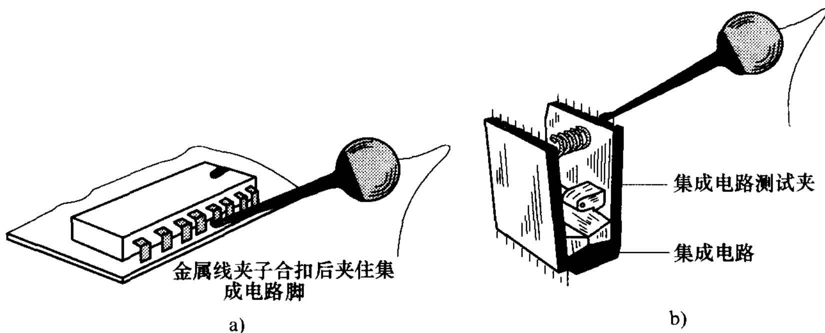


图 13-52　使用测试夹对集成电路引脚进行测量

a）测试夹直接对集成电路进行测试　b）测试夹与集成电路连接器相连接

器引脚底部的导体相连接来进行读数，如图 13-53 所示。

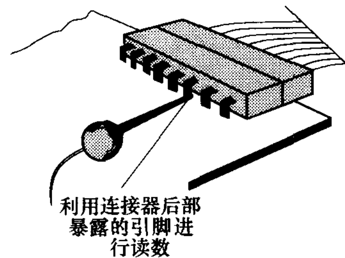


图 13-53　利用连接器进行测试读数

13.17.2　脱焊技术

脱焊意味着从先前的焊接点上去除焊锡，焊接中常用的两种技术为：

1）芯吸；

2）气吸。

13.17.2.1　芯吸

在芯吸过程中，将加热的灯芯质材料用松香浸透，放置在将要脱焊的焊接点顶部，由于毛细作用先前与焊接点粘接的焊锡将会迅速的流动到松香区域，从而只剩下没有焊锡的焊接点。

采用芯吸的方法去除焊锡可以使用空心的编成辫状的屏蔽线或一段多股线完成，适合于脱焊工作的芯吸线可以通过购买获得，使用芯吸方法进行脱焊的技术如下所述（见图 13-54a）：

1）将芯吸线置于将要进行脱焊的焊接点顶部。

2）将烙铁头放置在芯吸线的上部，烙铁的热量会熔化焊锡，熔化的焊锡随即流入芯线。

3）将已经吸入焊锡的芯线剪掉，重复这一步骤直到所有的焊锡从焊接点去除。

需要特别小心以确保辫状芯线与工作区域相连时焊锡不被冷却，否则当试图从焊接点将辫状芯线拉开时可能会损坏印制电路板上的铜印制线。对于一些复杂的焊接点，特别是下面将要介绍的气体抽吸方法效果不理想时，该技术就显得特别有效。

13.17.2.2 气吸

在气吸过程中，可以使用橡皮球（见图 13-54）作为焊锡吸管（抽吸器），抽吸器采用气体压力来完成吸气作用（用以去除焊锡）。

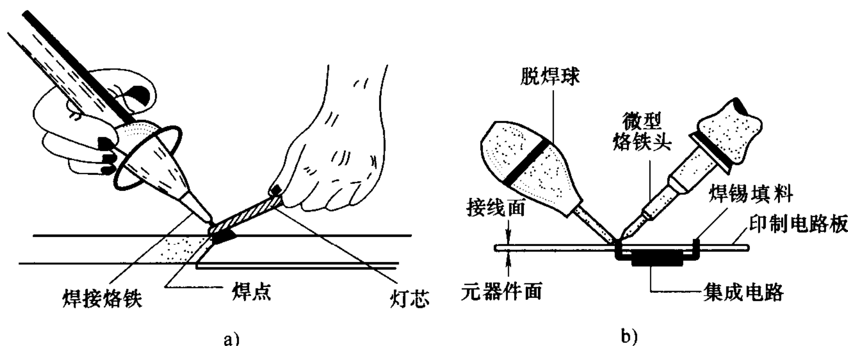


图 13-54 脱焊的芯吸过程和气吸技术
a）脱焊的芯吸过程 b）脱焊的气吸技术

另外一种真空型的抽吸器使用一种弹簧式的活塞。

抽吸时采用下列步骤：

1）首先将橡皮球中的空气挤出。

2）随着橡皮球被压扁，将抽吸吸管的尖端置于将要去除的焊锡附近。

3）用烙铁将焊接点加热，烙铁头应当置于焊锡上面而不能接触抽吸器。

4）抽吸器球体上的压力应当缓慢地释放，以使空气通过抽吸器吸管进入吸球，随着空气的吸入，它会将熔化的焊锡拉入吸管中。

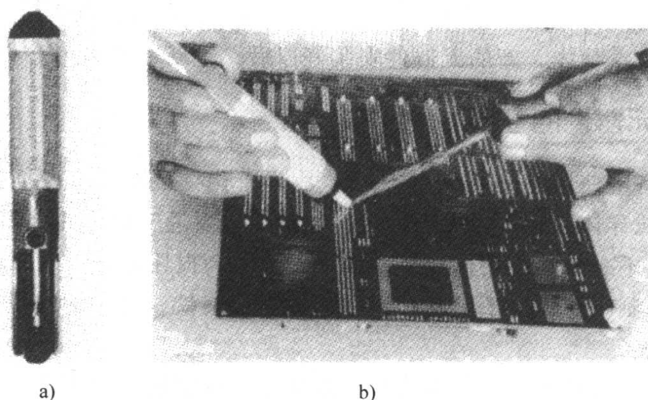
5）当焊锡完全被吸入吸管中以后，将抽吸器移开焊接点，随着橡皮球再次被压扁，收集的焊锡被挤出。

脱焊泵是另外一种去除焊锡的器件，它采用一种弹簧式的机械装置。使用该器件时（见图 13-55），弹簧竖起处于准备击发的状态，使真空泵的尖端紧靠焊接点，当焊锡熔化时，触发装置开始运行使弹簧释放，创造一个真空环境。有些此类器件会产生静电荷，使用时需要确保产品是“抗静电”的。

对于难处理的焊接点和那些与电压层（表面或多基板）相连接的焊接点，可能需要增加一些新的焊锡或助焊剂然后再进行脱焊，通常，如果初次脱焊只去掉了部分焊锡，则剩余的焊锡将不易清除，除非再在焊接点上施加一些新的焊锡。

必须牢记的一个重要的注意事项是脱焊所需要的热量可能会损坏基材和邻近的元器件，故脱焊必须使用恰当的工具以便在脱焊过程中产生最少的热量。

再加工过程中，花费一些时间和精力防止铜箔从印制电路板上起翘和被损



a)　　b)

图 13-55　真空脱焊泵及使用真空脱焊泵进行脱焊

a）真空脱焊泵　b）使用真空脱焊泵进行脱焊

坏是值得的，因为一般来讲，印制电路板的价格较昂贵。

不要使用锋利的物体，比如麻花钻等从元器件安装孔中去除焊锡，这类尖锐的物体可能会破坏镀通孔导体。

去除像集成电路这类多引脚元器件时，带来了一个特殊的问题，如果即将去除的元器件仍然可用，则脱焊必须快速，以防其被高温所破坏，另一方面，如果即将去除的元器件是失效的，元器件的脱焊也同样要相当迅速，以避免由于过多的热量使印制电路板上的导电铜箔起翘。

解决上述问题需要特殊的工具，例如烙铁头是特殊的双列直插封装型的烙铁、弹簧式集成电路拔除工具等（见图 13-56）。将该工具置于将要去除的集成电路的上部并将其紧扣在固定的位置，当烙铁头加热时，热量施加于双列直插封装集成电路所有的引脚上或电路板铜箔的一侧，随着焊锡的熔化拔除工具从印制电路板上将集成电路提起。其他类型的集成电路和晶体管管壳可以使用另外的特殊脱焊工具。

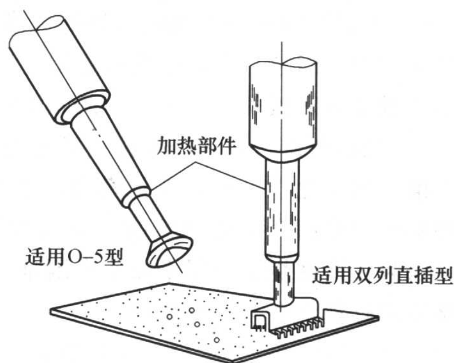


图 13-56　适用于集成电路的特殊脱焊烙铁头

覆有硅树脂保形膜的电路在去除覆膜后可以进行修理，去除覆膜可以采用溶剂溶胀技术或机械磨蚀技术，损坏的元器件可以通过脱焊去除，也可以使用

标准的全板烧熔技术实现。

清理掉旧焊锡以后，该区域应当用浸透溶剂的拭子进行彻底的清洗，以保证良好的焊接点替换，新的元器件安装好以后，重新覆膜即可。

13.17.3 元器件的替换

现代设备中使用的印制电路板通常是镀通孔类型的，其两面的绝缘材料上都粘接着金属导体，在进行元器件替换以前，需要遵守以下几项预防措施：

1）避免不必要的元器件替换，因为这可能会损坏电路板或邻近的元器件。

2）在蚀刻电路板上不要使用大功率的焊接烙铁，过多的热量会使导体松动或破坏电路板。

3）只能使用抽吸器件或木头牙签来从元器件安装孔中去除焊锡，绝不能使用锋利的金属物体来作这项工作，因为这样可能会破坏镀通孔中的导体。

4）焊接完成后，从焊接区域去除过多的助焊剂并施加保护膜以阻止污染和锈蚀。

替换元器件时应按照下列步骤进行：

1）仔细阅读设备服务手册上提供的元器件替换程序。

2）如果是可使用的，需要关掉电源。

3）移开组合装置、插头和电线会使修理工作更加便利。

4）给将要去除的元器件作标记。

5）在去除元器件之前仔细观察它是如何放置的，需要记住的信息包括元器件的极性、放置的角度、位置、绝缘需求和相邻元器件。

6）注意只能触摸印制电路板的边缘，指纹尽管看不见，却可能引起板子上污物和灰尘的积累，导致电路板通常应当具有很高阻抗的部分其阻抗电桥变低。在必须触摸电路板的情况下，为防止指纹问题的发生应当佩带手套。

7）把将要进行处理的焊接点表面的干膜或密封材料去除，去除时可以采用蘸有推荐使用化学品的棉头涂药器。不允许大量的溶剂被滴在电路板上，因为这些不纯的东西会从电路板的一个地方流到另外一个地方。电路板需要进行清洗，因为用烙铁烧穿一层干膜非常困难，另外，如果干膜在加热前没有被去除，电路板的外观将会大大改变。

8）加热印制电路板焊锡面焊锡的轮廓线，采用脱焊工具（抽吸工具），轻轻的、仔细的将元器件去除。烙铁温度不能过热否则会导致铜箔起翘或镀通孔脱落。

9）对于多引脚元器件来讲，必须使用真空脱焊工具在元器件从电路板上分离之前将元器件所有引脚上的焊锡去除。这一程序必须仔细地进行因为多引脚的元器件在修理过程中导致印制电路板损坏的概率更大。

10）有些元器件从电路板上去除非常困难，因为在使用机器插入元器件时其每一个引脚都是弯曲放置的，引脚弯曲的目的是为了在回流焊接制造过程中使元器件保持在某一位置，该过程使所有元器件的焊接一次性完成。为了使批量焊接时机器插入元器件更容易去除，在脱焊加热时需要使用小的螺钉旋具或镊子将印制电路板背面元器件的引脚拉直。

11）将元器件从印制电路板上去除以后，去除元器件的周围区域需要用蘸有溶剂的棉头涂药器进行彻底清洗，另外，镀通孔或电路板的其他区域可能还有残留的焊锡，这些也必须予以去除以便使新的元器件容易插入。

12）用清洗工具，例如编线工具对新元器件或新部件的引脚进行清洗，需要时还可以使用研磨料，对于导线引脚，还必须去除绝缘皮。获得良好焊接点的秘诀就是使所有的一切都洁净光亮而不仅仅依赖助焊剂达到这一效果。对于多股的引线，将其拧成一股，并从距绝缘皮 3mm 的地方镀锡。

13）将替换元器件的引脚成型以适合安装孔的间距，将元器件的引脚插入安装孔并将新元器件按照原始元器件的位置进行定位，不要用强力将引脚插入安装孔，因为尖锐的引脚端可能会破坏镀通孔导体。

14）以一个高机械强度的焊接点开始，不要完全依赖焊锡将接头连在一起，如果有可能，应放松每一条引线或穿过端线孔洞的元器件引脚。若没有孔洞，则应将其缠绕在元器件终端上，轻轻的用针头钳进行固定。

15）加热进行焊接的部位而不是加热焊锡（Raby，1994）。将焊锡的末端与焊接部位相接触而不是与烙铁或焊枪相接触。一旦终端、引线或元器件引脚受热，焊锡将凭借毛细作用流动，填充空洞完成可靠的电气和机械连接。可以用焊接烙铁将焊锡送到焊接点，且焊锡应当完全覆盖焊接点。焊接时应当注意焊接的温度和焊锡的用量，检查电路板的元件面以使焊锡良好回流。需要牢记 SN63 是焊接电子元器件的最好的一类焊锡，SN60 也可以使用。

16）移开烙铁使焊锡冷却凝固，这段时间不要振动电路板，否则将会产生不良焊接，形成所谓的“冷焊接点”。

17）使用异丙基酒精清洗区域中泼溅的松香助焊剂和残留物，注意不要将棉花纤维留在印制电路板上，将电路板在空气中完全风干。

18）如果有可能，应在维修区域施加保护膜，并在空气中风干。

19）检查焊接点或维修部位常常是有好处的，该检查可以使用欧姆表（万用表）来测量焊锡与元器件引脚的电阻。除了短路外的所有有缺陷焊接点都可以通过读数知道，发现的有缺陷焊接点由裂纹、凹点、冷应力、助焊剂过多或焊锡不纯净造成。

20）当处理半导体器件或微电子集成电路元器件时，经常使用热沉技术，当处理含有这些元器件的设备时，必须了解允许使用的特殊的焊接烙铁的型号、

电压范围以及其他需要考虑的因素。如果某一单元维修不当，则这些都应当是维修失败需要考虑的因素。

21）当替换元器件时，可能发现机械振动会对元器件产生严重的破坏，例如从一个桌子的高度摔到水泥地面上半导体器件就会被损坏，剪断元器件的引脚也会引起振动波而损坏精密的或脆弱的元器件。因此，对元器件的表面进行刮擦或剪断元器件引脚时应当避免工具或尖锐测试探针的不当使用。

22）当电源打开时去除或更换元器件是不明智的，因为这可能会产生电压或电流过冲，导致元器件本身或电路板上的其他敏感元器件遭到破坏。

13.18 表面贴装印制电路板的维修

在接下来的几年中，将几乎没有制造商会制造不包含 SMD 的印制电路板，使用正确的工具并具有使用所选用工具的知识对于电子维修业务是关乎生存的头等大事。表面贴装技术已经广泛应用了很长一段时间，但对于服务维修人员和机构来讲，SMD 移除和替换的工具为他们所接受却进展缓慢，这可能是由于这类工具的使用费用较大，技师们只是将手边的工具进行革新改进用来完成这项工作，但没有适当的工具有时会损坏整个电路板。随着价格高昂的电路设备的投入使用，它们需要更好的维护和使用，为了与维修人员的知识水平和经验相适宜，有理由为维修和再加工工作台投入资金。

电子元器件的装配已经由使用单面板过渡到了使用带有镀通孔的双面板，元器件的移除在某种程度上变得更容易些，相应的在维修和再加工工作中对印制电路板的破坏也减少了。但是，就与再加工相关的方面而言，使用表面贴装技术的印制电路板在本质上是单面印制电路板，因此，随着 SMD 使用的增加，由于元器件移除方法不恰当而导致的对焊垫和印制线破坏的情况经常发生。人们已经注意到这些损坏是由于操作人员和维修工人训练不足和对 SMD 印制电路板的操作缺乏了解所致。

SMD 组装过程中的再加工故障通常需要进行元器件的移除和替换，由于再加工经验不足，偶尔还需要移除和替换印制电路板上由于操作不当而被破坏的焊垫和印制线，下面就讨论移除一个有故障的多引脚 SMD（Morris，1990）。

13.18.1 剪断所有的引脚

剪断所有的引脚是移除一个发生故障元器件最简单的方法，如果其他方法不可行时才推荐使用这个办法。该技术就是依次穿过每一个引脚并将其剪断，然后把元器件摘除，再用一把温度可控制的烙铁，利用精细的烙铁头将每一个焊接点熔化，用镊子将剩下的集成电路引脚拿走。给予一段时间的冷却，用去

焊锡编织带将过多的焊锡除去。

该方法的优点是它很便宜，由于它不需要任何特殊的工具，在现场就可以进行，其缺点是它破坏了元器件，而且有可能损坏印制电路板的基板和铜焊垫。另外，使用焊接烙铁在原位置焊接替换后的元器件每次只能加工一个引脚，对于紧密引脚距多引脚元器件来说，即使不是不可能完成的任务，那也将是极为困难的。

13.18.2 加热方法

对于包含 SMD 的印制电路板，对其进行再加工时有两种基本的加热方法：传导和对流。传导再加工将加热工具与焊接点接触来实现焊锡的重熔，对流方法使用热气或热空气来熔化锡-铅合金。

1. 传导方法

用装有专门设计的烙铁头的焊接工具加热所有可以接触到的元器件引脚，它依靠电极与元器件引脚相接触，使元器件引脚正好平放在印制电路板的铜焊垫上。更复杂的再加工工作台使用精密控制的电流脉冲，使其通过电极对焊接点进行加热，使焊锡迅速达到重熔温度（大约 3s）。将焊接点上的焊锡熔化以后，一个内嵌的真空拾取器把元器件从电路板表面提起。该技术可以在焊接操作完成后使所有的引脚迅速的冷却，在焊锡固化后可以使所有的引脚固定在适当的位置上。

该方法有几个优点，它非常迅速，可以重复进行而且不会使元器件受热，它非常适用于替换元器件，因为在焊锡重熔的时候电极会使引脚平放在焊垫上，同时可以用显微镜来保证元器件排列整齐、位置正确。其缺点是设备昂贵且仅仅适用于鸥翼引脚（QFP）和卷带自动结合（TAB）元器件。

2. 带有真空拾取的双重加热器

这是一种处理大型元器件移除的特殊工具，双重加热器可以使较大的烙铁头很快达到所需的温度，内嵌的真空拾取装置可以允许在焊锡重熔建立后单手移除元器件，它可以移除所有传统的扁平封装元器件和几种矩阵式球垫表面黏装组件（BGA）。

热镊子带有双重加热器具有挤压功能，可以移除小芯片、有脚塑料封装芯片载体（PLCC）和无引脚封装等许多种部件。这种镊子可以使其头部接触焊接点，这就保证了很高的热量传递，使其本身保持在可能的最低温度。

3. 对流方法（热气焊接）

大多数制造和再加工工作台都使用热气或热空气作为热量传输媒介。使用单点喷嘴，就可以移除一些小部件，例如芯片、晶体管、小型外贴脚集成电路（SOIC）以及扁平封装元器件。将热气扫过引脚使焊锡达到完全重熔，然后将部

件用镊子提起。尽管采用对流的方法其移除时间比使用传导工具所用的时间长，但采用对流法使用一种工具或者一种形状的喷嘴就可以处理多种应用。对于较长的元器件，在机头上安装特殊的喷嘴部件，它可以几乎使所有的两面或多侧面 SMD 松动并予以移除，即在焊锡重熔以后真空拾取器将元器件提起。还有使用红外线来重熔焊接点的再加工工作台可供使用，一些辅助性的部件常常还包括用来移除失效元器件的真空拾取装置和放大系统，有时还有视频播放单元（VDU），以帮助观察正在进行的工作。

13.18.3　SMD 的移除和替换

使用热气设备移除一个元器件应当采用下列步骤：

1）在所有的焊接点上使用少量的液态助焊剂。

2）选用适合的机头与元器件相匹配。

3）将印制电路板定位以后，打开热风使每一个焊接点的焊锡都重熔（使用显微镜或视频播放单元进行检查）。

4）如果元器件使用粘结剂粘接，则旋转机头对其进行剪切。

5）利用真空拾取器把元器件拾起并对印制电路板进行冷却。

6）使用精细的去焊锡编织带将剩余的焊锡去除。

7）给予一段时间进行进一步冷却。

8）对焊垫进行检查以保证其完好无损。

为替换元器件，需要遵守下列程序：

1）应当仔细检查新元器件以确保其没有弯曲或变形，理想情况下元器件的引脚应当从元器件体向下偏斜 1°～2°，这样当元器件放置在印制电路板上时，就可以使引脚平放在焊垫上了。

2）轻轻的将一层薄助焊剂使用在焊垫上。

3）将元器件放置到热气设备的机头中，并将其仔细地排列在印制电路板上，快速焊接带上面的指状物也会帮助排列元器件。

4）在气体回流开始以前，元器件应当离开印制电路板表面，直到引脚刚好从焊垫上扫过为止。

5）开始使用炙热的气体，此时气体将对引脚和焊垫上的焊锡进行加热。

6）当焊锡熔化以后，将元器件仔细地放置在印制电路板上，确保元器件的每一个引脚刚好放置在指状印制带上，这样元器件就会保持在焊垫的中央。

7）使热气继续流动几秒钟以确保焊锡在每一个引脚周围适当的流动。

8）当焊锡进行适当流动以后，关掉热气并使电路板至少冷却 1min，在将印制电路板从设备上取下时要避免焊接点的振动。

9）将电路板仔细地取下后移开快速焊接带并将焊接点上过多的助焊剂清理

掉。

10）用十倍的放大镜仔细检查所有的焊接点以确保正确的回流。

11）用气雾剂形式的异丙醇清洗印制电路板，清洗时确保溶剂渗透到元器件的下面以洗净所有的助焊剂，然后用刷子将该区域内所有的助焊剂痕迹刷洗干净。

13.18.3.1　维修损坏的焊垫

表面贴装板最常见的损坏就是方扁形封装体（QFP）布设的焊垫浮起，造成这种现象的最可能的原因就是操作者难以知道何时封装元器件所有四个边上的焊接点都熔化的时间，从而导致过度加热造成焊垫浮起。建议使用下面的方法来维修这种类型的故障。

1）将被破坏的焊垫或印制线移除，并立即清洗电路板上紧靠的区域。

2）选择适当的替换印制线或焊垫（这可以从某些提供商处获得）。

3）将替换焊垫或印制线焊接到电路板未被破坏的印制线上，图 13-57a 给出了替换焊垫和部分印制线以及将要与之相连接的部分未被破坏的印制线。将替换的印制线剪短且使其与未被破坏的印制线有部分重叠，将这两部分焊接到一起，如图 13-57b 所示。Purdie（1991）讲解了如何将一个损坏的或设计错误的表面贴装印制电路板以及电路板的组装进行修改或修复，使其处于良好的状态。

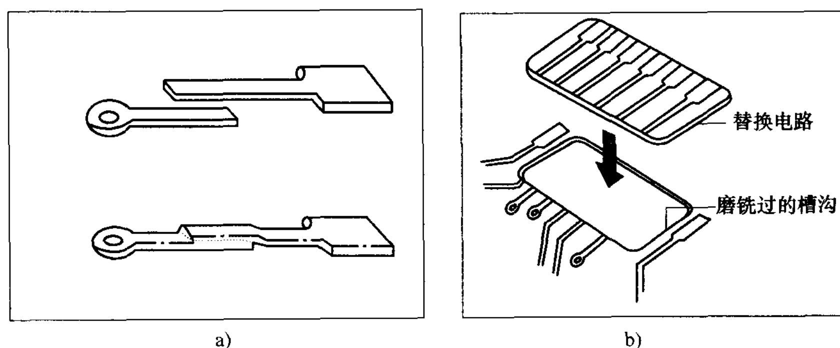


图 13-57　加工修理及结实耐用的维修
a）加工修理　b）结实耐用的维修

4）使用能够耐高温的粘结剂将新的焊垫或印制线粘接到印制电路板基板上，将其夹紧直到粘结剂固化。

5）将替换后的元器件焊接到适当位置。

6）清洗残留的助焊剂。

7）再次涂敷一些由于修理而被清除的防焊膜。

SMD 的移除可以与用蒸气使邮票从信封上脱离相类比。实际操作时同时将元器件焊接点周围的焊锡熔化，然后将元器件提离印制电路板，再对基板进行清洗并将一个新的元器件焊回到电路板上。对焊锡和元器件引脚进行加热的最佳方法是可以选择的，为此可以使用传导工具、对流工具，单点和多点以及镀锡和不镀锡的烙铁头进行加热。

13.18.3.2 维修损坏的镀通孔

对一个连接双面板的损坏的通孔进行重制作有三种方法（Willis，1992），它们是：

1）通孔镀铜：该过程包括将一系列的电镀溶液强行灌注到将要进行维修的通孔中，这样就可以模仿最初的电镀工艺了。该方法不适合单个通孔的维修。

2）熔融的铆眼：使用铆眼在工业制造中作为标准已经有好几年了。该设计会在电路板上形成溢胶，出现总浮空现象，印制线空间受限制的现代印制电路板更加限制了这种维修方法的使用。

3）使用铜环层：铜环层是在不同型号的焊锡丝外表面镀上大约 30μm 厚的铜层，然后再次对其进行电镀以保护表面焊接性。将其置于损坏的通孔中成型并熔化，经过这样处理的铜环层并不比原始的通孔电镀层占用更多的空间，因此在元器件引脚插入并进行相应焊接以后，也不能被检测出进行过维修。图 13-58 显示了用铜环层来替换印制电路板上损坏的镀通孔。

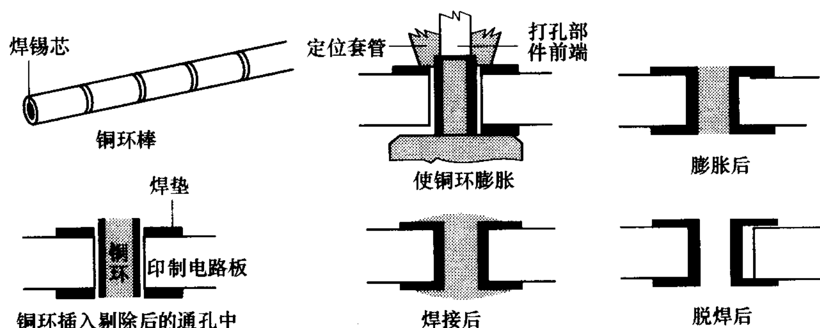


图 13-58 使用铜环层来维修损坏的镀通孔
（经 Willis 同意重绘，1992）

通孔组装中，在将有缺陷的元器件移除和更换以前需要对其进行脱焊，将新元器件安装到电路板上之前要确保将焊锡从通孔中取出然后进行清洗，对于表面贴装电路板则进行脱焊。二者的不同在于对于通孔电路板，使用真空工具将熔融的焊锡从引脚和镀铜孔中移除或吸走，采用热空气工具或焊锡罐将通孔中所有的引脚同时进行重熔，然后将元器件移除。对于表面贴装电路板，必须对元器件所有的引脚同时加热，在焊锡再次凝固以前将元器件从电路板

上移开。如果所有的引脚不是被同时加热，在焊锡熔化以前就将元器件拔除，则会破坏电路板上的脚垫，这会影响安装在印制电路板上的新元器件的共面性。

Hunn（1990）阐述了为将热量释放到所需要的地方，人们设计了载有一系列精细喷嘴的多种机头，它可以将热量导向焊接点。为减少加热机头主体热量的传播需要非常仔细，尽可能使所有热金属部分远离芯片，以便在芯片上方形成一个较凉区域。上述努力可以使焊接点直接吸收热量而芯片本身则保持凉爽。

随着越来越多的制造商在其表面贴装设计中使用紧密引脚距技术，再加工技术变得更为复杂。随着电路板紧密引脚距变得越来越细密，电路板对元器件的排列不整齐和印制电路板的热损坏越来越敏感，因此对紧密引脚距电路板的再加工通常需要某些种类的显示系统。由于引脚的距离变得越来越近，显示系统同时对印制电路板和元器件本身进行显示是必不可少的，因此，在更换紧密引脚距元器件时，为保证正确的排列应当使用光学元器件。考虑到所有这些因素，理想的再加工工作台应当包括：

1）用来放置和焊接元器件的显示系统；

2）最小移动距离小于电路板上所使用的元器件最小引脚距离的放置工具；

3）能够控制加热过程的加热方法，能够以近似原始制作所使用的方法对电路板和元器件进行加热，在元器件的移除和更换过程中必须能够施加均匀的热量，不引起电路板的分层且不损坏元器件；

4）设备灵巧便利、使用简单，对于操作者和工程师来讲都不必进行过多的训练。

13.18.4　再加工工作台

目前的印制电路板上有矩阵式球垫表面黏装组件（BGA）、直接晶粒安装（DCA）、晶粒级封装（CSP）和紧密引脚距 SMD，采用手持工具对其再加工不能满足电路板的性能和所需的精细程度，再加工区域的面阵元器件更增加了其困难程度。由于裸芯片镀金或镀锡铅的突块处于芯片的底部，它与焊垫的互连不容易排列和检测，发生的破洞、桥接和其他缺陷也不容易发现，除非进行功能测试才能检测出来。而且，使用焊接烙铁进行手工脱焊以及灯芯抽锡需要控制多个参数，例如烙铁头的温度、在每一个焊垫上停留的时间、施加的压力、影响的区域以及接触的区域和位置等。另一方面，真空脱焊工具需要控制真空流动、与焊垫的距离、热空气的流动（如果需要应用）、温度源的压力等。上述的多数参数直接与操作者的技巧有关，有可能会导致过渡加热，对焊垫、印制线和防焊膜产生破坏。使用自动工作台消除了对技师技

巧的依赖，为再加工操作提供了一个可靠的、具有令人满意的质量和成本效率的可行方法。

目前市场上有许多不同类型的再加工设备可供使用（Hodson，1993b）。一个典型的再加工工作台就是美国 M/s Howard 电子设备公司的 SD-3000 模型，它是一个采用微处理器控制的工作台，它使用单一喷嘴向 SMD 的焊接点吹出热空气。该设备适合于任何尺寸和形状的 QFP、SOP、PLCC、PGA、BGA 等，以去除焊锡或对焊锡进行重熔，它可以处理所有的 SMD 而不必更换喷嘴头，一个内嵌的计时器可以防止其损坏印制电路板和对邻近的部件过度加热。

该设备提供的各种控制旋钮如图 13-59 所示，详述如下：

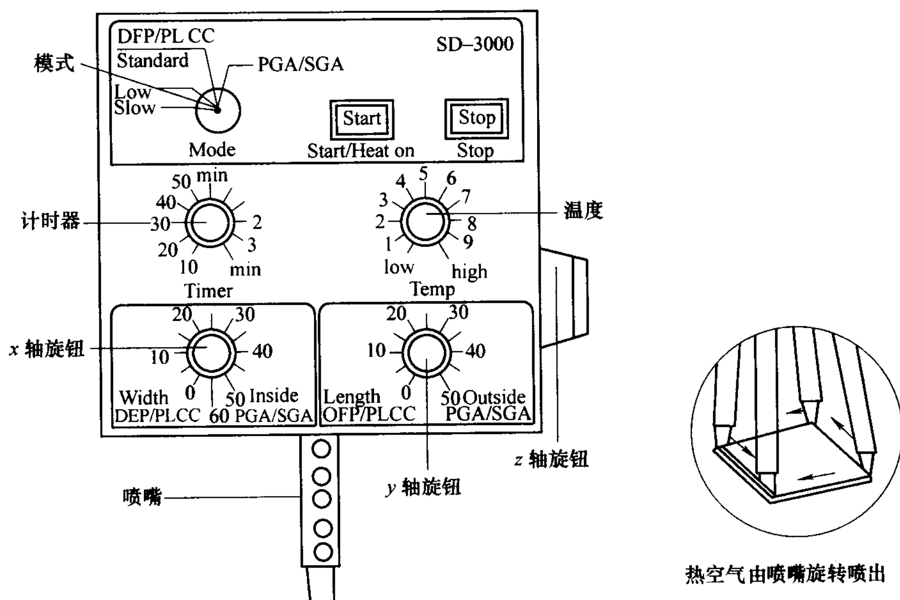


图 13-59 典型的再加工工作台控制面板

1）*x* 轴旋钮：这个旋钮用于调节用于重熔元器件的喷嘴宽度，它也可以用于 BGA/PGA 器件移除时的内部调整。

2）*y* 轴旋钮：这个旋钮用于调节用于重熔元器件的喷嘴长度，它也可以用于 BGA/PGA 器件移除时的外部调整。

3）*z* 轴旋钮：*z* 轴旋钮用于控制调整将要重熔的焊接点上方喷嘴的高度。

4）喷嘴：喷嘴由 *x* 轴、*y* 轴和 *z* 轴旋钮进行调整，它可以围绕着将要移除的元器件的焊接点旋转，喷嘴上的小孔可以允许操作者根据加热线圈的颜色对加热器的温度进行视觉控制。

5）计时器：计时器用于在“开始（Start）”按钮按下以后为达到所需的焊

锡熔化温度设定时间。在时间周期的末端，设备自动进入冷却周期，到达其冷却温度后切断电源。

6）温度：该控制旋钮用来控制所有模式中加热器的温度，其温度值由操作者自由选择或确定。

7）模式：模式开关提供了 BGA/PGA 模式和 QFP/PLCC 标准封装模式之间便利的转换，它还有高值空气流动（12 l/min）和高温两种模式。

在“低（Low）”模式中，可以获得低速率的空气流动（6 l/min），该模式用于高密度的电路板，这样电路板在回流焊接中板子上的小芯片就不会偶然的吹落。

另外，“低（Low）”模式在旧的焊锡已经从焊垫上移除，新的焊锡膏已经涂在准备进行回流焊接的新元器件上时，用来替代 QFP/PLCC 封装模式。

8）开始：第一次按下“开始（Start）”按钮，开始旋转喷嘴以调整其宽度和长度，调整完成以后，第二次按下“开始（Start）”按钮，开始空气的流动、加热和定时。

9）停止：任何时候按下“停止（Stop）”按钮都会停止加热并将喷嘴提升大约 1/2in，以便使真空拾取器从印制电路板上拾取元器件。

再加工工作台上另外一个可用的设施是一个用来固定印制电路板的机械装置，用真空拾取器拾取将要从电路板上移除的集成电路，并使印制电路板很容易调整以便于在热空气喷嘴的作用下在它上面排列元器件。

对 QFP 或 PLCC 器件进行再加工的时候，采用下列步骤将有助于以较低的温度在较短的时间内对焊接点进行重熔。

1）在所有的时间内使喷嘴的高度保持在电路板上方 1mm 或 2mm 处，这可能需要一个夹具来固定电路板和加热头/喷嘴组件。

2）在不对周围焊接点过度加热的情况下使用尽可能高的空气流动速率。

3）如果需要，则可以使用助焊剂。

采用上述步骤，技师们就可以使用连接工具逐渐形成自己的再加工过程，并理解其对组装的影响。Buckley（1990b）详细描述了清洗、检测、再加工和表面贴装组装测试的程序。

再加工工作台也可以利用中波长的红外辐射，其发出的射线波长范围为 2～8μm，然而，人们希望再加工系统能够完全保护热敏元器件，使用红外技术作为放射线达到这一点是可能的，可以通过使用阻热带或铝箔来对射线进行防护。这样就可以将邻近芯片的焊接点温度保持在其熔点之下，哪怕其距离只有 0.5mm。该系统可以从 M/s ERSA GmbH 公司购得，如图 13-60 所示。

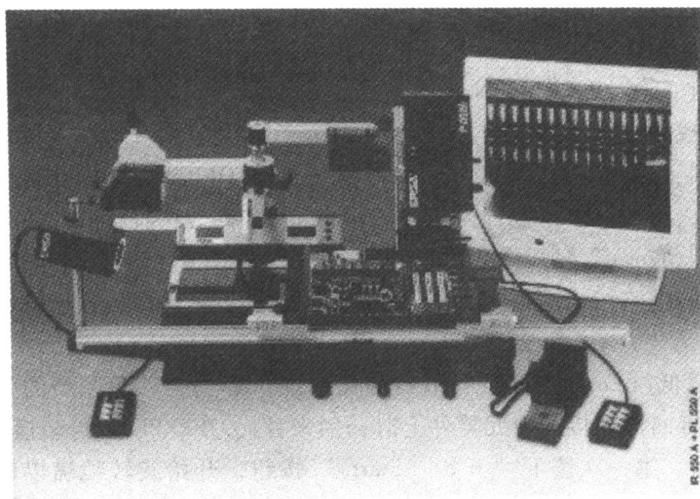


图 13-60 使用红外辐射基于回流技术的再加工工作台
（经 ERSA GmbH 同意）

13.19 几个常用标准

1）IPC-ESD-2020：静电放电控制程序开发的联合标准。包括静电放电控制程序所必须的设计、建立、实现和维护。根据某些军事组织和商业组织的历史经验，为静电放电敏感时期进行处理和保护提供指导。

2）IPC-SA-61A：焊接后半水成清洗手册。包括半水成清洗的各个方面，包括化学的、生产的残留物、设备、工艺、过程控制以及环境和安全方面的考虑。

3）IPC-AC-62A：焊接后水成清洗手册。描述制造残留物、水成清洁剂的类型和性质、水成清洁的过程、设备和工艺、质量控制、环境控制及员工安全以及清洁度的测定和测定的费用。

4）IPC-DRM-40E：通孔焊接点评估桌面参考手册。按照标准要求对元器件、孔壁以及焊接面的覆盖等详细的描述，除此之外还包括计算机生成的 3D 图形。涵盖了填锡、接触角、沾锡、垂直填充、焊垫覆盖以及为数众多的焊接点缺陷情况。

5）IPC-TA-722：焊接技术评估手册。包括关于焊接技术各个方面的 45 篇文章，内容涉及普通焊接、焊接材料、手工焊接、批量焊接、波峰焊接、回流焊接、气相焊接和红外焊接。

6）IPC-7525：模板设计指南。为焊锡膏和表面贴装粘结剂涂敷模板的设计和制造提供指导方针，还讨论了应用表面贴装技术的模板设计，并介绍了带有

通孔或倒装晶片元器件的混合技术，包括套印、双印和阶段式模板设计。

7）IPC/EIA J-STD-004：助焊剂的规格需求—包括附录Ⅰ。包含松香、树脂等的技术指标和分类，根据助焊剂中卤化物的含量和活化程度分类的有机和无机助焊剂；还包括助焊剂的使用、含有助焊剂的物质以及免清洗工艺中使用的低残留助焊剂。

8）IPC/EIA J-STD-005：焊锡膏的规格需求—包括附录Ⅰ。列出了焊锡膏的特征和技术指标需求，也包括测试方法和金属含量的标准，以及粘滞度、塌散、焊锡球、粘性和焊锡膏的沾锡性能。

9）IPC/EIA J-STD-006A：电子等级焊锡合金、助焊剂和非助焊剂固体焊锡的规格需求。为电子等级焊锡合金，为棒状、带状、粉末状助焊剂和非助焊剂的焊锡，为电子焊锡的应用，为特殊电子等级焊锡提供术语命名、规格需求和测试方法。

10）IPC-Ca-821：导热粘结剂的通用需求。包括对将元器件粘接到合适位置的导热电介质的需求和测试方法。

11）IPC-3406：导电表面涂敷粘结剂指南。在电子制造中为作为焊锡备选的导电粘结剂的选择提供指导。

12）IPC-AJ-820：组装和焊接手册。包含对组装和焊接的检验技术的描述，包括术语和定义；印制电路板、元器件和引脚的类型、焊接点的材料、元器件安装、设计的规范参考和大纲；焊接技术和封装；清洗和覆膜；质量保证和测试。

13）IPC-7530：批量焊接过程（回流焊接和波峰焊接）温度曲线指南。在温度曲线获取中采用各种测试手段、技术和方法，为建立最佳图形提供指导。

14）IPC-TR-460A：印制电路板波峰焊接故障排除清单。为可能由波峰焊接引起的故障而推荐的一个修正措施清单。

15）IPC/EIA/JEDEC J-STD-003A。印制电路板的焊接性测试。

16）J-STD-013：球脚格点阵列封装（BGA）和其他高密度技术的应用。建立印制电路板封装过程所需的规格需求和相互作用，为高性能和高引脚数目集成电路封装互连提供信息，包括设计原则信息、材料的选择、板子的制造和组装技术、测试方法和基于最终使用环境的可靠性期望。

17）IPC-7095：BGA 器件的设计和组装过程补充。为正在使用 BGA 器件或考虑转到阵列封装形式这一领域的人们提供各种有用的操作信息；为 BGA 的检测和维修提供指导并提供关于 BGA 领域的可靠信息。

18）IPC-M-108：清洗指导手册。包括最新版本的 IPC 清洗指导，在制造工程师决定产品的清洗过程和故障排除时为他们提供帮助。

19）IPC-CH-65-A：印制电路板组装中的清洗指南。为电子工业中目前使用

的和新出现的清洗方法提供参考，包括对各种清洗方法的描述和讨论，解释了在制造和组装操作中各种材料、工艺和污染物之间的关系。

20）IPC-SC-60A：焊接后溶剂的清洗手册。给出了在自动焊接和手工焊接中溶剂清洗技术的使用，讨论了溶剂的性质，残留物以及过程控制和环境方面的问题。

21）IPC-9201：表面绝缘电阻手册。包含了表面绝缘电阻（SIR）的术语、理论、测试过程和测试手段，还包括温度、湿度（TH）测试，故障模式及故障排除。

22）IPC-DRM-53：电子组装桌面参考手册简介。用来说明通孔安装和表面贴装装配技术的图示和照片。

23）IPC-M-103：表面贴装装配手册标准。该部分包括有关表面贴装的所有21个IPC文件。

24）IPC-M-104：印制电路板组装手册标准。包含有关印制电路板组装的10个应用最广泛的文件。

25）IPC-CC-830B：印制电路板组装中电子绝缘化合物的性能和鉴定。护形涂层符合质量及资格的一个工业标准。

26）IPC-S-816：表面贴装技术工艺指南及清单。该故障排除指南列出了表面贴装组装中遇到的所有类型的工艺问题及其解决方法，包括桥接、漏焊、元器件放置排列不齐等。

27）IPC-CM-770D：印制电路板元器件安装指南。为印制电路板组装中元器件的准备提供有效的指导，并回顾了相关的标准、影响力和发行情况，包括组装技术（包括手工和自动的以及表面贴装技术和倒装晶片的组装技术）和对后续焊接、清洗和覆膜工艺的考虑。

28）IPC-7129：每百万机会发生故障数目（DPMO）的计算及印制电路板组装制造指标。对于计算缺陷和质量相关工业部门一致同意的基准指标；它为计算每百万机会发生故障数目基准指标提供了令人满意的方法。

29）IPC-9261：印制电路板组装体产量估计以及组装进行中每百万机会发生的故障。定义了计算印制电路板组装进行中每百万机会发生故障的数目的可靠方法，是组装过程中各阶段进行评估的衡量标准。

30）IPC-D-279：可靠表面贴装技术印制电路板组装设计指南。表面贴装技术和混合技术的印制电路板的可靠性制造过程指南，包括设计思想。

31）IPC-2546：印制电路板组装中传递要点的组合需求。描述了材料运动系统，例如传动器和缓冲器、手工放置、自动丝网印制、粘结剂自动分发、自动表面贴装放置、自动镀通孔放置、强迫对流、红外回流炉和波峰焊接。

32）IPC-PE-740A：印制电路板制造和组装中的故障排除。包括印制电路产

品在设计、制造、装配和测试过程中出现问题的案例记录和校正活动。

33）IPC-6010：印制电路板质量标准和性能规范系列手册。包括美国印制电路板协会为所有印制电路板制定的质量标准和性能规范标准。

34）IPC-6018A：微波成品印制电路板的检验和测试。包括高频（微波）印制电路板的性能和资格需求。

35）IPC-D-317A：采用高速技术电子封装设计导则。为高速电路的设计提供指导，包括机械和电气方面的考虑以及性能测试。

第 14 章　质量、可靠性与可接受性

14.1　什么是质量保证

质量保证是为确保产品质量而提供的足够的行为需求，包括所有必需的计划或系统。它主要是为所有关心的问题建立信心而提供必要的依据，有效地履行与质量有关的行为。它可以看作是财政审计，通过独立的审计提供完整的财政保证。在当今世界的金融领域，有独立资格的公共会计师已经具有了一定的影响力，在制造和服务部门，质量保证专家有着越来越重要的作用。

包括印制电路板厂制造商在内的所有制造部门都有质量保证部门，质量保证部门负责所有与质量有关的行为，例如：质量筹划、质量控制、质量改进、质量审查和可靠性问题。

质量保证需要由证据或一系列事实来证明。对于简单的产品，证据通常是一些检查的表单或者是一系列事实和测试数据。然而，对于复杂的产品，证据不仅仅包括检查和测试数据，而且还包括对计划的考查和对计划实施的审查。这样，就有一系列的保证技术以适于各种产品的需求。

质量是针对功能需求而言的，只有把功能需求贯彻于整个设计和制造过程，才能达到预期的质量。因此，在印制电路板制造中，应该认真制定测试数量，以便于检测出所有的故障或缺陷并进行改进，使产品达到满意的程度。

14.1.1　缺陷的分类

无论是印制电路板的外表还是参数，任何达不到指定要求的地方都称为缺陷。根据缺陷的严重程度或者是对板子可能造成的影响，缺陷通常分成以下三种类型：

1）严重缺陷：经验表明，可能对个人应用、维护或依赖产品造成危险的或不安全情况的缺陷称为严重缺陷。这种类型的缺陷也可能使航天器、飞机或轮船的性能达不到所需的要求，甚至造成灾难性的后果。

2）主要缺陷：主要缺陷可能导致元器件或板子出现故障，或严重降低其实际功能的可用性。

3）次要缺陷：这种缺陷不会严重降低元器件、产品或板子实际功能的可用性。

任何给定数量的产品元器件中，每 100 个元器件中有缺陷的数量是用 100 乘

以其有缺陷元器件的数量，再除以产品元器件的总数。

$$每\ 100\ 个元器件中的缺陷量 = \frac{有缺陷元器件的数量}{被检测元器件的数量} \times 100$$

14.1.2 缺陷产品

缺陷产品是指产品、元器件或板子中包含一个或多个缺陷的产品。根据缺陷的性质，缺陷产品通常分为严重缺陷产品、主要缺陷产品和次要缺陷产品。

每 100 个元器件中缺陷产品的数量被定义为

$$缺陷百分比 = \frac{缺陷产品的数量}{被检测元器件的数量} \times 100\%$$

14.1.3 可接受质量标准

可接受性质量标准（AQL）是指产品质量的抽样调查结果中，缺陷百分比的最大值或者是每 100 个元器件中有缺陷产品的最大数量，该值被认为是一个符合要求的平均值。这意味着可接受质量标准是消费者能够接受的缺陷百分比（或每 100 个元器件中有缺陷产品数量）的标志值。

14.1.4 质量控制过程

在印制电路板工业中，质量保证程序需要对各个步骤进行控制，包括从开始使用的材料到产品完成，得到一个经过充分测试和组装的板子。下面将详细叙述实现质量保证的步骤。

1）使用材料的控制：所有使用的未加工的材料都要进行抽样调查和检查，以满足采购合同的图样、规格和其他条件。检查可能包括使用专业设备，在专门的机构或在外面的测试实验室进行化学分析和测试。

2）过程控制：包括生产流程中重要测试点的标识和材料的随机抽查。这使人们能对超出规范或控制的地方进行矫正，也有助于分离无法补救的不合格产品，不对它们进行进一步的加工。例如，镀层厚度的检测和导电镀层粘接力的测试。类似的，要测试每一块板子的电性能和短路、电路连续性以及电路验证。

为了正确进行过程控制、生产和检查，也需要对设备和工具进行定期的检查，确定其磨损、损坏程度，进行机械调整和电子校准，保持在原技术文件中规定的参数。

3）成品控制：在每 300 个完全封装的板子中至少有一个板子需要进行最后的核查，核查封装的完整性、标识和全面的质量，包括电子性能的测试。

14.1.5 统计过程控制和抽样检验方法

统计过程控制是使用统计的方法对生产过程中的变化进行测量和分析。过程控制就是当随机抽样的状态偏离其稳定状态时，控制其回到稳定状态。对于半成品或成品材料的检测称为“进料抽样检验”。进料抽样检验的目的是对一批材料的质量进行必要的评估（术语“批或批量”的意思是指产品元器件的汇总，从中抽取样品并进行检测，以确定其是否符合可接受的质量标准）。

抽样检验方案的制定根据的是需要什么样的产品，而不是根据加工过程本身的能力。印制电路板的抽样检验方案主要由下面几个因素决定：

1）控制操作的复杂性；

2）操作中产生缺陷的程度；

3）每批量产品需要检测的频率；

4）在线测试过程中允许的延迟时间；

5）抽检产品的尺寸。

每个控制类别中抽样检验方案的选择和完成质量控制使用的方法要根据该类别的标准确定。例如，进料抽样检验需要从 3000 个产品中随机抽取 125 个进行检查和评估。如果发现 3 个或 3 个以上的主要缺陷，这批产品就为不合格产品。在线控制的抽样检验方案由质量控制检查员根据超出控制过程的数量决定。

14.2 质量控制检测

质量控制检测通过以下几个步骤完成：

1）预生产检测：它包括直观的和空间的检测、显微剖切检测、电镀结合力检测、端子拉力检测、弯曲和扭曲检测、吸水性检测、焊接性检测、镀通孔结构检测、热冲击检测、热应力检测、互连电阻检测、抗潮湿性检测、绝缘电阻检测、绝缘强度检测和击穿电流检测。

2）生产检测：在日常的生产阶段，按照提供的最小标准进行检测，以保证产品质量。通常情况下，需要进行以下的检测：

① 直观的和空间的检测；

② 在同一板子上的显微剖切检测；

③ 检测测试样品的电镀结合力、抗潮湿性和抗绝缘性；

④ 板子的线路检测。

为了有效地抽样检测，每周或每生产 5000 块板子之后都要做破坏性的检测，无论首先达到哪一个条件都要进行以下的检测：

1）直观的和线性的检测；

2）主要平面上的显微剖切检测；

3）端子拉力、吸水性、焊接性、镀通孔结构、热冲击、热应力、互连电阻、绝缘强度、载流能力等的检测。

如果任何一个或多个参数不符合规格，那么只有在检测到缺陷并且进行矫正之后，才能继续正常的生产。

多基板的最终检测是非常重要的，有两个最重要的地方必须要检测：

1）每个面板产品测试样品的显微剖切检测；

2）成品板的电子电路检测。

在多基板中，镀通孔的机械完整性是极其重要的。

14.2.1　质量保证检测的特征

就像在前面的章节中解释的一样，为了确保合格的质量保证，需要检测许多性能。所有要检测的性能如表 14-1 所示，表中定义了如下不同的标准：

1）LR = 用检测的必要条件限定的商用板；

2）HR = 高可靠性需求；

3）MIL = 军用规格；

4）1、2、3 = 由 IPC 指定的三个质量标准。

表 14-1　不同质量标准的测试性能（经 Coombs 同意，1988）

要求	LR	1	2	3	MIL	HR
电路电测试（100%）					√	√
载流能力	√		√	√		√
绝缘强度		√	√	√	√	√
回蚀						√
可燃性			√	√	√	√
绝缘电阻		√	√	√	√	√
内部短路	√	√	√	√		√
机械震动						√
显微剖切					√	√
抗湿性				√	√	√
出气						√
电镀结合力		√	√	√	√	√
镀通孔结构					√	√
焊接性	√			√		√
端子拉力		√	√	√	√	√

（续）

要求	LR	1	2	3	MIL	HR
热冲击					√	√
热应力					√	√
跟踪能力						√
振动						√
直观和空间性能	√	√	√	√	√	√
弯曲和扭曲			√	√	√	√
吸水性						√

成品印制电路板的质量取决于众多连续制作步骤的质量累积。从原始材料开始，经过加工，直到最终的检查和测试，整个过程可能包括40个或更多个生产工序，在每一步中都有可能出现缺陷，不加控制的操作积累对产品的质量和可靠性都可能造成破坏性的影响（Watts，1993）。

由于这个原因，越来越多的公司决定投资一个稳定的质量保证程序。典型的质量保证程序包括进料检验、在线产品检测和具有质量与可靠性保证测试的过程控制。

1/3 质量保证检测是预防性的测量，使额外的值达到最小，确保缺陷的概率降到最低。质量一致性测试好像一个筛子，在预防性测量时就会将不合格产品及时滤除。可靠性评估可以发现那些用其他任何方法不能检测到的潜在的或隐藏的缺陷。

在整个质量保证程序中，印制电路板制造者应该进行所有类型的测试。这些测试要认真定制，以便和资源、加工能力和消费者的需求相匹配。

14.2.2　质量保证程序的设计

在典型的印制电路板生产线中，加工步骤是给定的。在每一个重要的步骤中，为了监测产品质量，一步步的评估程序是不切实际的，也是不可能的。有竞争力的公司会找到最适宜的过程控制程序去进行制作过程中的产品检测。

一个最优的质量保证程序可以通过对每一个生产工序的检测值进行排序分析，以达到最好。评估步骤的最终选择可能根据许多标准而定，但应该考虑下列相关因素对质量的影响：

1）电路的功能性；

2）加工能力；

3）电路的长期可靠性；

4）缺陷的允许程度；

5）再生产能力；

6）消费者的需求；

7）后续加工（组装）；

8）产品成本。

从过程控制的角度来看，不足以说明装备精良和人员充足的控制研究室的重要性。电路制作取决于化学制剂的浓度，这占整个生产工序的 75%。如果厂商确实很认真地通过过程控制预防缺陷的产生，那么投资一个控制研究室是最基本的，同投资印制电路板制作过程一样，尽管应用基本的滴定测试可能完成大部分的化学分析，但是更多的控制需要用循环电压剥镀分析法、原子吸收法、紫外-可见光分光镜和气象色谱分析法完成。

14.2.3　进料的质量保证

尽管印制电路板的制作过程使用很多种原始材料，实际上制造商当场检测的只有很少的一部分。再者，这样做即不切实际又没有必要。十多年的研究工作已经使得化学制剂、抗蚀剂、基板和钻孔非常配套。为了紧跟消费者不断变化的需求，在供应部门内部的激烈竞争也使得产品不断改进。

拥有实验室设备的制造商可对基板和预浸材料快速地完成相关的检测，监测流动液体的浓度、进行加工的材料的药剂和树脂的含量。对覆铜板和预浸材料的直观审查足以挑选出有明显缺陷的产品。

14.2.4　质量跟踪

对于所有的被用在高可靠性应用/产品中的电路板，建立和保持质量跟踪程序是必要的。这是因为潜在的缺陷可能出现在后期，它会影响产品的可靠性。质量跟踪程序开始在基板的水平仪器面板上，通过流量过程继续到达一系列应用的串联装备。同样，对不合格电路板的记录也是有用的，因为可以确定在生产过程的质量控制中较易出现问题的环节。

14.3　质量控制的方法

在许多制造业中，一个主要的问题就是保证质量。在印制电路板的生产中，印制电路板可靠的电气性能和力学性能必须通过采用适当的质量控制方法实现。质量控制是从基本的原始材料的获得和设计阶段开始的。

在印制电路板制造阶段，基本的质量控制方法可分为以下三种类型：

1）物理检测；

2）光学检测；

3）电气检测。

通过物理检测，可以知道印制电路板的各种空间尺寸和样品的整洁度。在光学检测中，通过显微镜和其他检测设备可以对电路板进行多方面的观测，显示出许多有关制造过程和产品的信息。显微剖切是最主要和最可靠的检测方法之一，它可以看见电镀的质量、镀层的厚度等，得知许多有关电路板质量的信息。

14.3.1 显微剖切评估

确定印制电路板质量的主要方法之一是显微剖切评估。显微剖切是印制电路板很少的一部分，它镶嵌在一种坚硬的铸造材料中以便于展现镀通孔半圆柱面的样本。

通过对这个截面的显微镜分析，可以对电路板制作的过程和质量控制进行内部观察。显微剖切评估可用于评估像铜箔电镀、回蚀、打孔和成层等操作。

大部分印制电路板供应商都有制造和评估显微剖切样品所必需的装备和技术。许多印制电路板供应商都能给消费者提供评估数据和横截面图。

然而，在实验室生产显微剖切也是有益的。一个样品板的横截面图评估可用于评估新的电路板供应商，也可作为一个进料程序的标准。这种技术也有助于发现与过程相关的故障原因，如圆柱体破裂、气孔的形成和机械应力的影响。

1. 设备和成本

显微剖切评估系统包括一个车间用显微镜、切片托架粘结剂以及和其他各种各样的材料，这个系统必须有 100 倍的最小放大能力和一个 0.010mm 分辨率的十字线（Falco，1991）。

显微剖切评估是一种破坏性的方法。它通常在一个印制电路板的测试片上完成，该测试片必须具有与实际的印制电路板相同参数的电路图形。显微剖切评估是从大块的材料中取下一小部分，然后将其装入一个合适的塑胶中，以便在浇铸和磨光操作过程中保护金属层。

铸模形成后，进行一系列的研磨操作，获得一个便于显微镜检测的高磨光表面。包括电镀中层的厚度和几何形状等许多信息都可以通过显微镜检测到。通常，镀层厚度可以是单独的，也可以按照图 14-1 中所示求取平均值。

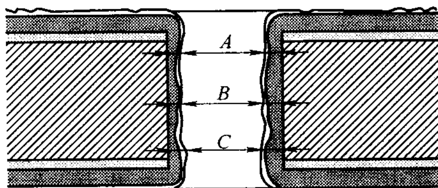


图 14-1 通过使用竖直的横截面求孔的镀层厚度（经 Coombs 同意，1988）

2. 显微剖切的相关步骤

制作一个成功的印制电路板显微剖切包括以下基本步骤

1）大块切削；

2）精密切削；

3）贴装或封装；

4）细磨；

5）粗磨；

6）抛光；

7）用显微镜观测。

（1）大块切削

大块切削是指从母板上切除一小部分，该部分包括要观测的区域。大块切削时要远离要观测的区域，以避免损坏邻近的金属层。

（2）精密切削

精密切削是一个严格的程序，它会产生一个用于观测的无损坏的精确或是大体接近的面板，需要使用低速锯来完成这一操作。大块切削的面板被送入到很薄的旋转钻石刀刃下，它最适合对印制电路板进行精密切削。

安装在进刀臂处的千分尺给出切削的尺寸，使操作者能够准确地完成切削，获得精确的观测面板。

（3）贴装或封装

贴装或封装是为金属的精密外层提供必须的保护，以避免其在后来的磨光操作中受到损害。另外，在显微镜下观察期间，它也为样本提供合适的支撑。样本通常在室温下完成环氧树脂的固化，此时环氧树脂的收缩率低、硬度好，且得到的样本是透明的。通常，完成环氧树脂的固化大约花费 6～8h。

（4）细磨

细磨是通过使用 240、320、400 和 600 粒度的金刚砂纸，进行一系列的研磨步骤完成的，这样可减少对样本的损坏。研磨可人工完成，也可用一个旋转的砂轮完成。研磨后，样本在用布轮抛光之前，应用水彻底清洗以除去研磨微粒。

（5）粗磨

粗磨的作用是去除细磨残留的划痕，为精确地观测生成一个平坦的表面。用棉球把金刚石研膏均匀地涂抹在样本的表面，并把样本放在一个旋转的砂轮下完成粗磨。在抛光前，样本需要彻底清洗。

（6）抛光

通过抛光，生成一个有光泽、无划痕，且平坦的表面，从而可以获得精确的观测结果。通常使用氧化铝浆水，然后把样本放在旋转轮处抛光。

（7）用显微镜观测

用来观测截面的显微镜应该是一个有着完整的垂直面照明系统的冶金学中使用的显微镜。一个合适的显微镜必须具备以下装置：

1）物镜镜头使用放大倍率为5～50倍，镜头视野平坦；

2）目镜带有十字线：测定镀层的厚度；

3）照明系统：对于简易的观测，钨灯是足够的。如果拍照，最好使用氙灯或卤素灯。

4）照相机：用于内层拍照。

印制电路中显微剖切评估的应用如表14-2所示。

表14-2 印制电路中显微剖切评估的应用

检测阶段/参数	检测的功能
选用的基板	评估织物的结构 检测基材和铜箔的缺陷
化学镀铜	电镀质量、厚度 钻孔质量
焊料熔合	电解铜与锡-铅的质量和厚度 电镀的均匀性和厚度
金黄色的短小突起	电镀的均匀性和厚度

因为显微剖切评估是破坏性的测试，所以在印制电路板实际电路的外面，提供了许多特别的孔，这些孔与实际电路在相同的条件下制作完成。通过对这些孔的分析，就可以很好的观察印制电路板的制作过程和质量，并且不破坏印制电路板实际的电路图形。

14.4 印制电路板的检测

印制电路板的制作包括许多生产工序。为了生产优质的产品，有必要在生产过程中的每一步进行适当的检查和测试。为了确保产品的可靠性，不论采用何种在线质量控制方法，最终的检测都是至关重要的。

从经验和统计数字看，在组装好的印制电路板中估计大约有75%是组装故

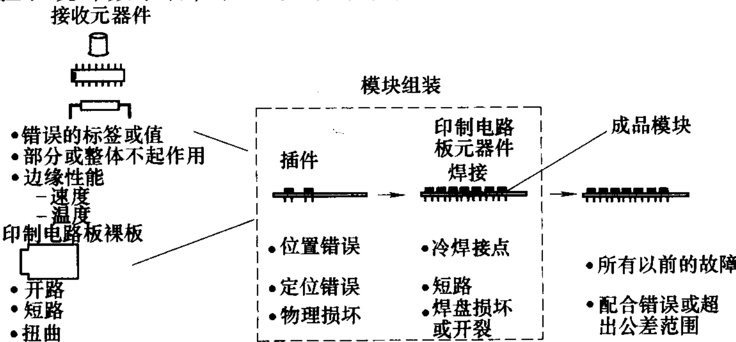


图14-2 模块故障分布图（经Coombs同意采用，1988）

障，20%是元器件故障，5%是板子自身的故障。图 14-2 表明了一些组装的印制电路板中常见的故障。

14.4.1　电路板的自动检测

随着表面贴装技术的引入，电路板的封装密度飞速增加。因此，即使对于密度不高、一般数量的电路板，电路板的自动检测不但是基本的，而且也是经济的。在复杂的电路板检测中，两种常见的方法是针床测试法和双探针或飞针测试法。

14.4.1.1　针床测试法

这种方法由带有弹簧的探针连接到电路板上的每一个检测点。弹簧使每个探针具有 100～200g 的压力，以保证每个检测点接触良好，这样的探针排列在一起被称为“针床”。在检测软件的控制下，可以对检测点和检测信号进行编程，图 14-3 是一种典型的针床测试仪结构，检测者可以获知所有测试点的信息。实际上只有那些需要测试的测试点的探针是安装了的。尽管使用针床测试法可能同时在电路板的两面进行检测，当设计电路板时，还是应该使所有的检测点在电路板的焊接面。针床测试仪设备昂贵，且很难维修。针头依据其具体应用选不同排列的探针。

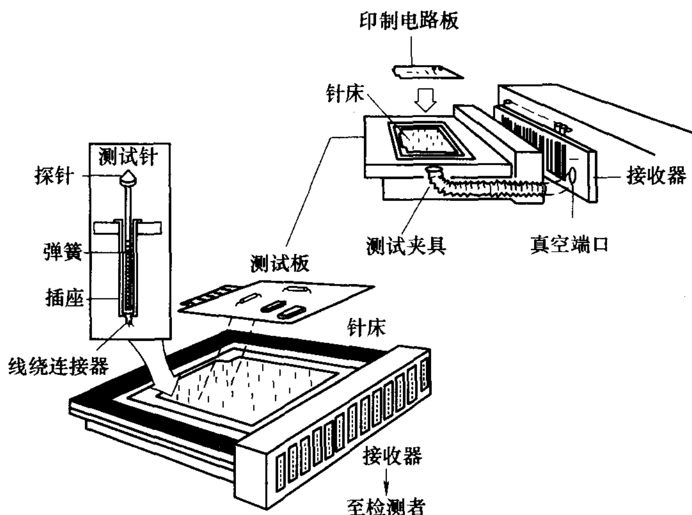


图 14-3　可对电路板进行自动测试的针床测试仪（经 Coombs 同意重绘，1988）

一种基本的通用栅格处理器由一个钻孔的板子构成，其上插针的中心间距为 100、75 或 50mil。插针起探针的作用，并利用电路板上的电连接器或节点进行直接的机械连接。如果电路板上的焊盘与测试栅格相配，那么按照规范打孔

的聚酯薄膜就会被放置在栅格和电路板之间，以便于设计特定的探测。连续性检测是通过访问网格的末端点（已被定义为焊盘的 x-y 坐标）实现的。既然电路板上的每一个网络都进行连续性检测。这样，一个独立的检测就完成了。然而，探针的接近程度限制了针床测试法的效能。

14.4.1.2 双探针或飞针测试法

飞针测试仪不依赖于安装在夹具或支架上的插脚图案。基于这种系统，两个或更多的探针安装在 x-y 平面上可自由移动的微小磁头上，测试点由 CAD/Gerber 数据直接控制。双探针能在彼此相距 4mil 的范围内移动。探针能够独立地移动，并且没有真正的限定它们彼此靠近的程度。

带有两个可来回移动的臂状物的测试仪是以电容的测量为基础的。将电路板紧压着放在一块金属板上的绝缘层上，作为电容器的另一个金属板。假如在线路之间有一条短路，电容将比在一个确定的点上大。如果有一条断路，电容将变小。

测试速度是选择测试仪的一个重要标准。针床测试仪能够一次精确地测试数千个测试点，而飞针测试仪一次仅仅能测试两个或四个测试点。另外，针床测试仪进行单面测试时，可能仅仅花费 20～30s，这要根据板子的复杂性而定，而飞针测试仪则需要 1h 或更多的时间完成同样的评估。Shipley（1991）解释说，即使高产量印制电路板的生产商认为移动的飞针测试技术慢，但是这种方法对于较低产量的复杂电路板的生产商来说还是不错的选择。

对于裸板测试来说，有专用的测试仪器（Lea，1990）。一种成本更为优化的方法是使用一个通用的仪器，尽管这类仪器最初比专用的仪器更昂贵，但它最初的高费用将被个别配置成本的减少抵消。对于通用的栅格，带引脚元器件的板子和表面贴装设备的标准栅格是 2.5mm。此时，测试焊盘应该大于或等于 1.3mm。对于 1mm 的栅格，测试焊盘设计得要大于 0.7mm。假如栅格较小，则测试针小而脆，并且容易损坏。因此，最好选用大于 2.5mm 的栅格。

Crum（1994b）阐明，将通用测试仪（标准的栅格测试仪）和飞针测试仪联合使用，可使高密度电路板的检测即精确又经济。他建议的另外一种方法是使用导电橡胶测试仪，这种技术可以用来检测偏离栅格的点。然而，采用热风整平处理的焊盘高度不同，将有碍测试点的连接。

通常进行以下三个层次的检测：

1）裸板检测；

2）在线检测；

3）功能检测。

采用通用类型的测试仪，可以对一类风格和类型的电路板进行检测，也可以用于特殊应用的检测。

14.4.2 裸板检测（BBT）

逐渐增加的走线密度和过孔数量使得电路板在组装前进行检测变得更为重要。早期的印制电路板平均有 400 个通孔，其中超出 25% 的是过孔，平均有 200 个网路。由于密度的增加，典型的印制电路板可能有大约 2000 个通孔，其中 40% 的是过孔，并且大约有 600 个网络连接。这些高组装的印制电路板故障率的增加，有时可能甚至达到 20% 。

一些故障率大的机械装置已经被确认，它会导致整个电路故障达到一个较高的程度。在走线间距不到 0.01in（0.25mm）的高密度和多层印制电路板中，这些故障的修复是极其昂贵的。

另据观察，在极端湿润的条件下，铜箔上会发生电化学反应，可能造成一些短路。干膜阻焊膜的应用不但会导致电路板上出现空洞，特别在距离很近的导线之间。空洞能吸收湿气和容纳灰尘粒子，可能导致短路。因为短路、断路、刻痕、泄露和污染可能发生故障，因此在印制电路板装配前必须对板子进行测试。

随着走线密度和通孔数量的增加，在印制电路板装配之前进行测试已经成为必需。据观察，高组装的印制电路中的故障率可能高达 20% 。如果在装配阶段前没有测试板子，高密度和多基板的后期故障修复将是非常昂贵的。在安装昂贵的部件——例如专用集成电路和微处理器之前，首先要检测裸板是否达到预期的质量标准，这可以使成本最优化。因此，对于印制电路板制造商来说裸板测试已经成为了必须。

14.4.2.1 板子的故障原因

除非出现严重的故障，通常都认为印制电路板的功能是可靠的。人们总是期望印制电路板能够像先前设计的那样极好地实现其功能，希望它能经受环境的影响，这取决于产品的力学、电气和化学性能。通常，印制电路板的性能和可靠性在很大程度上取决于印制电路板制造中使用的覆铜板的电气的、力学的和化学的性能。

板子上灰尘的存在或其他任何形式的玷污可能导致漏电、腐蚀和电子元器件故障，以至于整个设备出现故障。这些污染物的检测在裸板阶段可以完成，对于在单面或双面印制电路板上发现的一些故障，如开路、短路、银盐等很容易修复，而对于多层印制电路板内基板上出现的同样的故障则较难消除。

14.4.2.2 检测技术

随着印制电路板变得越来越密集，印制电路板制造商对裸板进行检测也变成了必须。可以用全自动设备检测任何地方的 10000 ~ 50000 个之间的节点和网路系统，电气检测则必须用非常高的电压来检测玷污。

裸板检测常用的一套方法是自动光学检测和电气检测。自动光学检测是一种用于内层检测的在线检测工具，但是它的检验能力有限，例如镀通孔的电气连通性。同样，自动光学检测不能鉴定出成层后的多基板中劣质的内部互连(Dytrych，1993b)。另一方面，电气检测有助于发现潜在的缺陷，像离子污染物和毛细裂缝，这些缺陷很细小，很难通过自动光学检测发现。对于细小的形状，大部分制造商联合使用电气检测和自动光学检测在成品时进行检测。Straw (1992) 详叙了紧密引脚距裸板电气检测中疑难问题的一些解决方法。

裸板检测通常是核查走线之间有无短路以及走线的连通性。这些检测通过全自动测试仪完成，这种全自动测试仪能检测多达5000个节点和网路。

对于单面或双面印制电路板的切口和短路，也可以使用光学手段，通过目视检测的老方法进行检测。一个更有效的检测多基板的方法是通过使用X射线扫描，这种方法对板子的结构进行深入的内部观察，可以很快地检查到缺陷所在。

14.4.2.3 电气检测

(1) 绝缘电阻

为了测量绝缘电阻，一开始就应该准确地确定检测电压。然后从一个网络到所有其他的网络进行检测。一旦确认有漏电，上述网络到网络的检测可重复进行以便于确定精确的漏电路径，而且这样的检测可以重做。通常，绝缘电阻的测量使用100~250V的电压，其典型的不合格阀值范围为10~100MΩ。

(2) 击穿电压

击穿电压的检测由时间和所用的电压决定。通常在10ms之内完成这些检测，这样可以得到一个可靠的结果。然而，即使在这个时间内，为了避免损坏被检测的印制电路板，应控制能量的释放。如果板子的工作电压低，则击穿电压的检测是没有必要的。

(3) 连通性

这是任何印制电路板最常见、最广泛的检测项目之一。为了确保准确的结果，这种检测通常在一个网络系统的两个节点之间进行。连通性测量通常在10~500Ω的范围之内。

14.4.2.4 裸板检测仪器

虽然裸板检测使用的大多数针床测试装置看起来是相同的，但是需要考虑其个别的因素，以使夹具的使用达到最少，有效地控制成本。由于这些原因，大部分的栅格可用导线连接起来，最多达50000个检测点，用作一个普通的通用装置，个别的测试夹具需要设计或购买。

标准栅格图样：无论选择何种栅格装置，都必须有这样一个基本思想，就是要使得测试节点最少，同时能测试的区域最大。最简单的方法之一是在一块

大板子上蚀刻许多较小的电路，这样会节省许多处理时间和检测成本。在装配以后，较小的板子可以从较大的板子上切割下来。测试这些小板将更费时，并且最终将增加更多的成本。但是这些作为一块大板子的一部分的小板的测试将不仅减少测试时间和成本，而且最终会有非常高的产量。

购买栅格系统考虑的另外一个重要因素是它的费用。购买一个专用栅格系统可减少最初的购置成本。但是购买通用的测试栅格系统，尽管最初的费用可能更昂贵一些，但通过减少个别配置的费用，可弥补它最初的花费。另外，与通用的栅格图样相比，专用装置需要许多存储空间。通用的栅格装置面临的主要的问题之一是无法提供偏离栅格的测试探针。

即使采用计算机辅助设计，一些测试点也不能精确定位于栅格点上，但会在两个这样的栅格之间。使用专用的栅格测试仪后，这些点则很容易被测试到。需要说明的是，随着板子走线密度的增加，两个走线之间的距离会变得比针的直径还小，因此这使得针床测试法在高密度印制电路板产业中的应用划上了一个问号。

最新的印制电路板技术包括引脚的中心间距为 0.020in 或更小的方形扁平封装（QFP），引脚的中心间距为 0.050in 或更小的球栅阵列封装（BGA），以及其他小焊盘的部件。这些元器件的使用表明，需要设计新的测试装置以适应新技术的发展。Hallee（1996）建议在某一固定装置的设计中，偏差大的长插脚实际上会打消对昂贵的、密度加倍的栅格电子装置和组件的需要。还指出不管有关电子测量系统的质量如何，如果与印制电路板的可靠的、可重复的机械连接出现故障，那么这一测试过程就是有害的。

14.4.2.5　裸板测试设备中的夹持系统

通常，裸板测试中使用两种类型的夹持系统，它们不是真空夹持系统就是气压夹持系统。专用设备大多数使用真空夹持系统设计，真空夹持系统比气压夹持系统更便宜。在这个系统中，被检测的板子放置在测试探针上方，橡胶垫放置在板子上，使用泵抽出装置中的空气，从而使探针和测试点之间产生连接。在气压夹持系统中，使用汽缸压缩将板子稳固地靠在针床上。使用真空夹持系统时，许多通用的栅格装置不能正常操作，因为加在探针上的压力不足以实现理想的控制。

一些使用真空夹持系统的通用栅格装置不能进行满意的操作，因为加在探针上的压力不足以实现理想的控制。例如，一个通用的栅格装置大约有 20000 个测试点，每个测试点需要 100g 的压力，总共将需要 2000kg 或 2t 的空气压力，保持所有的探针和板子上的测试点有一个良好的接触。如果压力不足，则测试不能达到令人满意的一致性。另一方面，气压夹持系统中来自汽缸的压力能提供一个更高的产量。Cronin（1995）解释道，常用于产生裸板检测程序的不同方

法可提供不同程度的测试规模。

探针组合件：在一个通用的栅格装置中，当探针的中心间距是 0.075in (1.875mm) 或更多的时候，探针是可以互换的（见图 14-4)。因此，它们安装在单独的套管或插座上。活塞头应该设计得能够与测试点良好接触。为了确保有效的电气连接，在正常接触时，探针应施加 4～8oz[⊖]的压力。在通用的栅格装置中，为了配合通孔膜的应用，探针应该有一个 0.2in（5mm）的最小横梁。为了正确测试，探针的内部电阻应该小于 10MΩ。

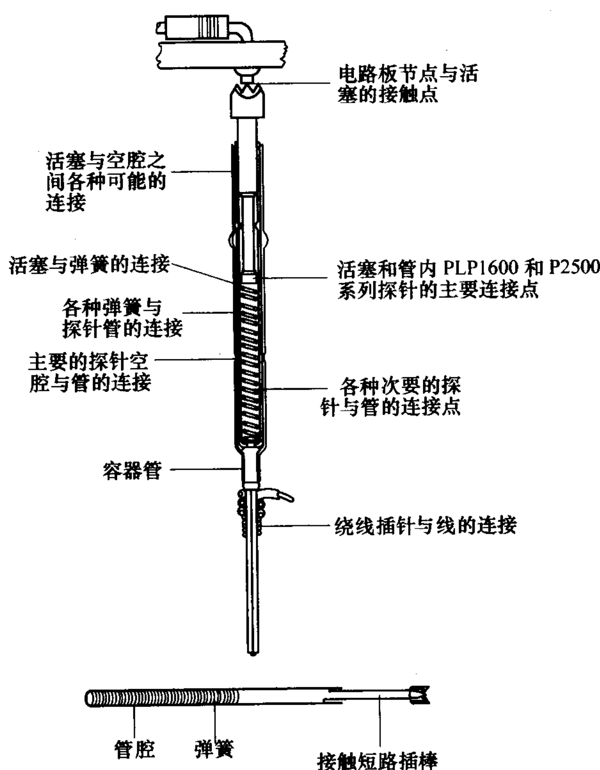


图 14-4　探针组合件中的弹簧接触系统

如果印制电路板使用计算机设计，那么在设计阶段自身就会产生一个测试程序，可以使用该程序对电路板进行测试。大部分裸板检测仪器有其自身的记忆模式。因此，可以对已经确定为“好”的板子进行测试，以获得必要的测试参数。以这些参数作为基础，就可以对其他的板子进行测试了。

M/s MicroCraft 介绍了一种裸板测试仪，它是一种有移动探针装置的小型测试仪，可以对印制电路板的两面同时完成连续性和绝缘性检测（www.vikingtest.com）。这种设计包括四个移动的探针、高速闭环伺服电动机、固件和视窗界面。四个移动的探针（两个在前，两个在后）在 x、y 和 z 方向移动，测试所有必要的焊盘位置的连续性和绝缘性。连续性测试包括高精度阻抗测试，以检测开路线路以及线路和焊盘、埋孔、盲孔和微孔之间的分离。绝缘性检测可通过使用指令调节高达 500V 的电压完成。

14.4.2.6　光学检测

⊖ 原书此处“oz”有误，应为“ozf”，1ozf = 0.278014N。——译者注

随着印制电路板密度的增加，在制作期间，传统的目视检测的方法对双面板或多基板的有效性比较低。尽管通过目测或电子连续性测试能很容易地检测到单面板或双面板的断路和短路，但是对于多层印制电路板内层的故障，它几乎是不可能检测到的。因此，一个更有效的多基板的检测方法是通过 X 射线进行扫描，通过这种方法可以对板子的内层结构进行深入的观测，很容易检测出故障。然而，光学检测不能检测出漏电、污染问题，不能测试绝缘电阻。因此，高标准的电气检测和光学扫描将产生零缺陷的印制电路板产品。

光学检测方法主要是使用放大镜检测。放大镜有几种类型，下面描述了最常用的几种放大镜。

1）单镜头放大镜：手动的或台式的放大镜能够很好地应用于低倍率的放大中，例如确定错误的、缺失的或方向偏离的部分，但是只有大约 2.5 倍的放大倍数。对于较高的放大倍数，要求的曲率只能用小直径的镜头获得，这样就会造成观察范围不充分。另外一个限制是随着放大倍率增加，焦距和工作距离会减少。

单镜头放大镜容易造成的一个问题是视觉疲劳。当从焦点的距离增加时，单镜头将更多地使图像放射状地变形。尽管不能立即觉察到这种变形，但观察几分钟可能引起严重的视觉疲劳或头痛。为减小这种变形，一种平面放大镜设计使用了两个凸镜。

2）屏幕投影系统：有几种产品可以将一个放大的图像投射到一个垂直的屏幕上，其中的一种声称不管是用单眼或双眼观测，都可以看到一个三维图像。使用双目并用的设备消除了视觉疲劳，并且消除了由于倾斜头引起的图像损失问题。双目并用的设备也要求调节以适应操作者两眼睛的距离，同时调节每个目镜的聚焦。

另外一个屏幕投影设备是光学比较仪。比较仪的用途就是区别“应该是什么”和“是什么”。其中的一个方法是，将产品的电路和它的镜像显示在分开的屏幕上，用这种方法可以很容易地区别出它们之间的差异。

3）立体显微镜：立体显微镜或许是最常用的一种检测工具。它们提供一个垂直的立体图像，在某些情况下，能够放大所关注的部分。改进的主要目标是增加精确性和生产能力，减小操作者的疲劳。显微镜的演变已经导致有角度的目镜、屏幕投影、倾斜角观察、摄影和录像接口、360°镜面旋转以及能够活动的可编程镜台等的结合。

4）显微镜类型：有两种主要的立体显微镜类型——格里诺和伽利略显微镜。更传统的格里诺显微镜有两个分离的光路，每一个都有它自己的物镜。更普遍的伽利略显微镜使用一个主物镜产生立体图像的两个光路（Samsami，1990b）。

格里诺显微镜具有特别好的对比度和颜色修正，因为每一个光路都能独立的修正。因为光轴通过每一个物镜的中心，所以这些显微镜也具有最好的分辨率。然而，这些显微镜上的物镜与镜筒的互换性受到了限制，而且扁平的物体只有在中心的一个狭窄区域内是清晰的。格里诺显微镜没有被严格地构造，这将最终使立体图像畸变，导致操作者疲劳，甚至会被认为显微镜失去作用。

一方面，伽利略显微镜具有主物镜的可交换性，更便于选择物距和放大倍率。这些显微镜也可以加入放大倍率变换装置或可变焦距镜头。也可能增加用于双重的观测、绘图、电视或摄影等的中间镜筒。最终，两个光程的平面景深将始终一致。另一方面，伽利略显微镜可能扭曲扁平物体，造成一种表面凸起的错觉。

通常光学性能的定量测量（例如线对/mm）不被公布，因为它们不能给出一个确切的功能性图片。例如除了光学系统之外，为了达到最适宜的观测设备性能，一定要仔细考虑照明系统。

通常，照明系统的亮度应该高，这样可引起眼睛的虹膜反应，给出更大范围的景深和分辨率。军用规格要求没有影子的照明系统，但是这却降低了对比度，使边缘观测和表面质量评估更困难。

照明系统有明视场和暗视场两种基本类型。明视场或同轴光沿着显微镜的光轴传播，且通过物镜。仅仅使用这种技术，使得聚光镜的数值孔径等同物镜的数字孔径。明视场图像提供了极好的颜色对比度和不失真的图像，这些图像具有浮雕状的边缘，不模糊，就像在暗场中一样，可以用于精确的测量。当在暗视场中时，因为明显化了消除的优势，所以这些图像也考虑了精密量度且给予了确切的测量。当观测磨光的表面时，明视场被视为是一个极好的方法，且在半导体应用中普遍使用。

然而有许多特征，例如表面缺陷，使用暗视场照明系统则更容易看见。暗视场图像是通过来自物镜外朝着样本的光线直接获得的。只有在样本上发出的反射或衍射光线进入物镜。对于那些在明视场中观测不到的细节，暗视场增加了其可见度。然而，暗视场聚光镜的数值孔径比不上同轴光系统，因而其价格较低。

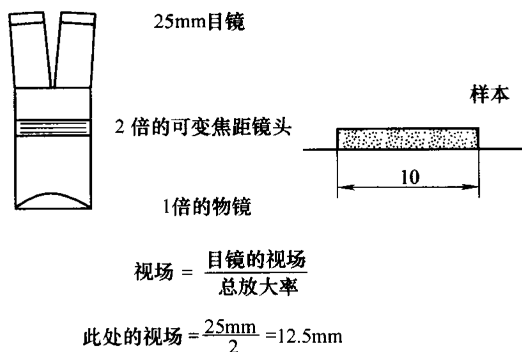


图 14-5 显微镜的视场允许观测到整个样本

一个典型的暗视场照明系统是光纤聚光灯。因为其镜面的性

能，它发射的光为一个窄弧。一个 2°的弧所适用的最大的聚光镜数值孔径为 0.0175，它对立体显微镜系统的分辨率的影响非常小。这种类型的照明有时会出现的一个问题是它能使发亮的焊接表面完全变暗。

照明的另外一部分难题是亮度、对比度和景深。分辨率增加有助于获得明亮的图像。实际上，亮度或强度直接和数值孔径成正比。然而，亮度也可使操作者疲劳，必须小心加以控制。分辨率的增加也降低了对比度和景深。

当手工操作板子，特别是在观测设备下进行再生产时，工作距离是很重要的。尽管大的工作距离可降低显微镜下图像的亮度，但同时它也降低了显微镜系统的分辨率。

为了减少板子的观测时间，最重要的一点是扩大板子的视场直径（见图 14-5），它对从立体显微镜中拍摄重照片或电视图像也很重要。显示的区域一定要足够大，以便随后的故障定位或拍摄更多的照片。

14.4.3 组装板检测

对多数组装板进行检测时，其故障谱大多如图 14-6 所示。开路和缺失、元器件未对准或错误是故障的第一位和第二位原因。虽然图 14-6 是一个典型的故障图形，但它是随着生产和过程变化的。事实上，每一条线路、每一个焊接点、每一个元器件和每一个接插引脚都有可能出现故障。板子的尺寸、走线的间距、封装类型、元器件类型、操作方法等，对组装板中的故障也都有着或好或坏的影响。因此，测试程序必须针对这些可能出现的故障进行设计，以确保产品的质量。

14.4.3.1 在电路中检测

在电路中检测的目的是找到缺陷存在的位置，纠正放置或焊接错误的元器件。在电路中检测主要是检查板子的组装错误，使用探针矩阵，将这些探针连接到板子上的线路节点上。检测者将一个激励信号加在一个单独的节点上，并将响应结果与标准值进行比较。在电路中检测有下面三个主要方法：

1）阻抗测试：测量两个点之间的阻抗，并和已知的好板子的阻抗相比较。

2）组件测试（模拟的和数字的）：这种测试基本的方法是施加一个信号并监控其输出。通常，无论模拟的还是数字的集成电路都不独立，所以，测试的输出结果可能与厂

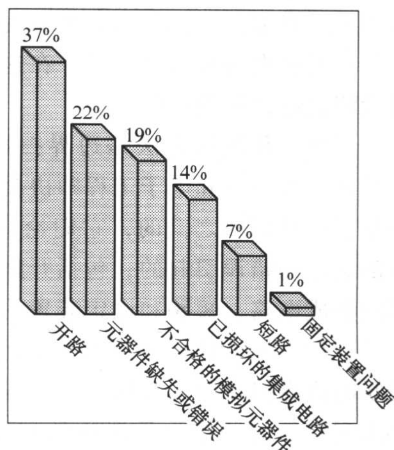


图 14-6　印制电路板故障谱
（经 Oresjo 同意重绘，1990）

商的数据手册中所给出的数据不匹配。通过测试元器件指定点的输出，并与好板子比较，可能确保集成电路和元器件极性的正确性。

14.4.3.2　功能测试

当印制电路板上的元器件在电路中或用导线连接时，则其处于真实的工作条件下，此时进行在电路中的功能测试是检测电路中问题元器件的一种有效的方法。原理上，它把测试元器件的功能和相应的数据库中理想元器件的功能进行比较，以查出问题元器件的位置。数据库包含元器件模型的数据信息，数据库中的每一个元器件模型都包括一系列的测试模式，即初始化部件、在部件的输入引脚施加驱动以及检测元器件输出引脚的响应正确与否。

功能测试对于查找有故障的数字元器件更有用。例如，它可以很容易地根据真值表检测一个简单的逻辑门、根据已知的时钟数检测计算器或移位寄存器。在测试期间，对元器件进行有关输入、时钟、控制信号和输出之间逻辑关系的操作，通过故障检测器以图表的形式显示出来，并和数据库中理想的元器件进行比较（Polar Instruments，2002b）。使用现代功能检测器，可以测试可编程器件，例如已经正确编程的 ROM 或 EPROM，还可以检测可编程接口设备对控制命令的正确响应。

14.4.3.3　边界扫描技术

随着 SMD 使用的增加，在许多板子的两面都贴装了元器件，并且无需通孔就可以使测试深针从板子的一面触及到每一个节点。因此，探针必须触及到的目标就变得非常少了。在不太复杂的板子上使用比标准的 100mil 的探针更小、更脆、更昂贵的 50mil 的探测变得十分必要。节点数增加，整个系统安装在一块板子上，在电路中测试这种或许是最普遍使用的电路板测试技术已经不足以完成所有复杂电路板的测试了。在这种情况下，可使用功能测试，但是研发一个功能检测程序是很费时的。

另外一种测试方法是边界扫描，边界扫描是对前面这些测试方法的补充，并且已经被电气和电子工程师协会（IEEE）采用，定为 1149.1 标准。这种方法是基于统计资料之上的，它们论证了大部分组装好的印制电路板的故障是由于外部制作的错误引起的，包括开路、元器件缺失或错误、不合格的模拟元器件、坏的集成电路、短路和固定装置的问题（Oresjo，1990）。

边界扫描的执行包括给所有的集成电路指定一个与元器件的输入、输出相关联的边界扫描单元（BSC），由边界扫描单元组成边界扫描寄存器（BSR），同时由定向的信号作为元器件的控制信号。边界扫描单元位于集成电路的周围，包围着其内部的逻辑电路。Evans（1991）给出了边界扫描测试的详细资料。

14.5　可靠性测试

可靠性测试的目的是查找印制电路板中潜在的缺陷，这些缺陷经过长期的或大量的操作后可能会显露出来。在产品的制作过程中，或随后的从极低温度到高温度（典型的 -65 ~ +125℃）的模拟条件的循环测试时，这些缺陷不能真正的显露出来。在重复的焊接和脱焊循环之后，通过结合力和再生产（re-work）的仿真评估镀孔结构的完整性。所有这些可靠性测试均在 IPC 标准 IPC-TM650 中（2.6.3，2.6.7.2，2.4.21.1 和 2.4.36 部分）给出。

如图 14-7 所示为印制电路板测试的体系结构，关系到用户的需求、测试的性能和测试产品的百分率，以确保电子产品的可靠性。

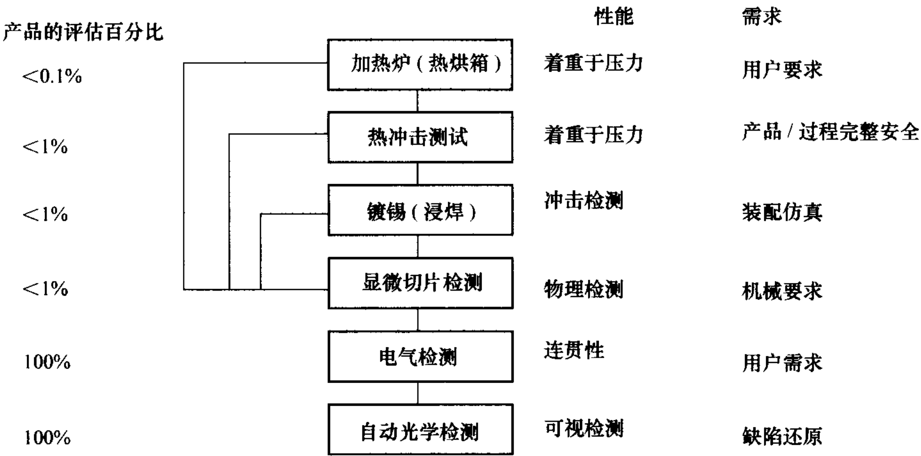


图 14-7　印制电路板测试的体系结构（www. smartgroup. org）

14.5.1　印制电路板的可靠性

影响印制电路板可靠性的两个主要故障源是：

1）镀通孔：它们的故障是破裂，这是因为它们是由热性能不协调的材料组成的，并且也结合了多基板的互连。

2）电绝缘性失效：阻抗水平的退化（开路或短路），影响电路的性能。

14.5.1.1　镀通孔的可靠性

影响镀通孔可靠性的主要因素是电路板受到热应力时，在铜层和 FR-4 环氧基玻璃合成物之间的热膨胀不相匹配。在波峰焊接、返工时，或者在组装、使用或存储期间的热循环，都会使热应力逐步显现出来。热量漂移通常会导致破裂，如角破裂、内层破裂或桶状破裂。Engelmaier（1991）对镀通孔的可靠性方

面进行了说明。

通常，镀通孔的可靠性测试是通过模拟镀通孔整个工作期间的热漂移环境进行的。军用印制电路板热冲击测试的规范为 MIL-P-55110（军用）规范，表 14-3 给出了热冲击测试的测试条件。

表 14-3　热冲击测试的测试条件

低温/℃	时间/s	高温/℃	时间/s	基板类型
-65	15	105	15	PX
-65	15	125	15	GE
-65	15	150	15	GB、GH、GP、GT、GX、GR、FEP
-65	15	204	15	GI

对样本进行电气连续性或短路测试。按照军用标号，基板类型有：

1）PX = 纸基板，环氧树脂，阻燃性；

2）GE = 玻璃（织布）基板，环氧树脂，阻燃性；

3）GB = 玻璃（织布）基板，环氧树脂，耐热性；

4）GH = 玻璃（织布）基板，环氧树脂，耐热性和阻燃性；

5）GP = 玻璃（非织纤维）基板，环氧树脂，聚四氧乙烯树脂；

6）GT = 玻璃（织布）基板，环氧树脂，聚四氧乙烯树脂；

7）GX = 玻璃（织布）基板，环氧树脂，聚四氧乙烯树脂，微波应用；

8）GR = 玻璃（非织纤维）基板，聚四氧乙烯树脂，微波应用；

9）FEP = 未填充的氟烃；

10）GI = 玻璃（织布）基板，聚酰亚胺树脂，通用。

1. 热应力测试

在 120 ~ 150℃之间，对印制电路板样本进行烘烤，在 287℃ ±5℃时在焊接池中能够流动或浮动 10s。

在热应力测试之后，样品进行显微剖切和缺陷检测。

2. 镀通孔可靠性改进

通过对镀通孔制作过程的研究，以下措施可改进镀通孔的可靠性：

1）内层使用 2oz 的铜箔。

2）增加镀层厚度。

3）使用易延展的铜箔。

4）一旦可行，使用非功能的焊盘。

5）限制小孔的使用。

6）在加工之前焙烤基板。

7）打孔或/和回蚀之后焙烤。

8）最小化回蚀。

14.5.1.2　绝缘电阻的可靠性

由于绝缘性能改变导致的可靠性问题有两种类型：绝缘电阻故障和低阻抗故障。

1. 绝缘电阻故障

绝缘电阻故障指从高电阻到低电阻的改变，它通常在一个长期的时间内缓慢地变化。在模拟测量电路中，阻抗的减小会引起严重的问题。这些问题在医疗设备中特别值得注意，例如，在医疗设备中，传感器与患者相连，其绝缘电阻的任何退化都可能有潜在的电击危险。绝缘阻抗故障导致了在电路板表面或者大块电路板中有害的电流通路（漏电流）的产生。

随着电路板元器件密度的增加和导体之间间距的减小，在电路走线之间绝缘材料的任何退化对板子的可靠性都会产生显著的影响。在电子检测期间，虽然最初的漏电流不太严重，在电路检测中不足以引发故障，但是这些泄露将随着时间的推移而增加，最后导致板子可靠性的下降。同样，在含有高灵敏度模拟电路的印制电路板中，如果印制电路板的表面和它的元器件不能免受污染，则电路的性能是不可靠的。对于这些情况，表面绝缘电阻测试是最重要的评估手段之一（Kamat 等人，1995）。

表面绝缘电阻是一种对绝缘材料表面电阻的度量，目的是检测导体之间电流的漂移。这对印制电路板制造商来说是一个非常重要的参数，因为在制造过程中留在板子表面的残余物，或由于不恰当的清洗或粗心的操作产生的污染物，都可能减少绝缘体阻止电流漂移的能力。经过正确清洗的印制电路板的电流漂移是可以忽略不计的，但是任何导电的污染物可增大电流（或减少表面绝缘电阻）。如果不能检测出残留物，漏电流可能最终使板子在使用中发生故障。

表面绝缘电阻的测量是使用一个连续的测试电压（100～500V，正向或反向极性根据具体的要求而定）进行预定时间（通常是 60s）的测量，从而得到一个电流值，通过欧姆定律：$R = V/I$ 计算出表面绝缘电阻值，这个电阻通常为千兆级或更大。因此，测量仪器的能力对电流的精确性有极大的影响，必须使用如静电计和微电流计这样的测试仪器。当电路板暴露于高达 85℃ 的温度和 90% 相对湿度的环境之后，需要进行重复测量。

2. 低阻抗故障

对于镀通孔，一定要保证电路的低阻抗。通常，当从低温到高温骤变时，会由于热冲击造成破裂故障。

14.5.1.3　绝缘电阻的可靠性测试

在印制电路板制作过程中，一些预防措施可能导致可靠性的巨大改善，并减少印制电路板中绝缘电阻故障的发生率。这些措施是：

1）清洗过程：在加工期间，消除任何残留在板子上的离子的或吸湿的物质。

2）在暴露的金属上面提供保护层。

3）小心谨慎的注意所用金属的迁移。

4）提供分开的接地层和电源层以及连接引脚。

5）在环境受控的区域使用成品，这些产品应该远离腐蚀性污染物质、灰尘、高温和湿气。

6）如果有可能，应增加元器件引脚的距离。

首要的一点，组装好的印制电路板的可靠性与元器件互连点的数量成反比。因此，在产品中最差的连接是连接器。一定要注意使用具有最高连接可靠性的技术。理想的连接点必须提供足够的机械强度和较低的电阻。

14.5.1.4　浴盆曲线

对于机械部分，像继电器、插头、插座和发动机，它们的磨损出现在元器件的整个使用过程中。因此，它们有很高的故障率，通常用传统的浴盆曲线描述，如图 14-8 所示。

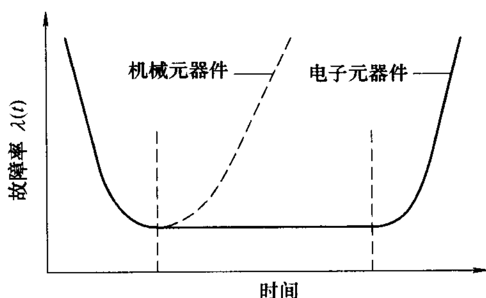


图 14-8　元器件随时间的故障率——浴盆曲线

14.6　印制电路板的可接受性

如今的印制电路板检测工程师正面对着比十年前更为严重的测试挑战。电路板的复杂性显著增加，具有了更多元器件、更多连接点、更高性能和更新的封装技术（Oresjo，2003）。元器件和连接点数量的增多使故障出现的机会增多，这可能导致产量的降低。由于复杂性增加，生产工艺对故障的数量也有影响。通过若干研究，已经发现在每个工序都可能使故障增加。

印制电路板组装的复杂性直接影响故障的数量，同样影响测试方法的选择。由于电路的高复杂性，没有严格的测试和检查程序会更难实现高产量。

14.6.1　验收标准

IPC 根据设备的应用和功能，已经建立了印制电路板验收的某些标准和准则。这些需要被验收的设备被分成下面的几类：

第一类：普通电子产品。包括消费类电子产品，例如电视机、玩具、娱乐电子设备、一些计算机和与应用配套的计算机外设，其中表面缺陷是不重要的，

主要的要求是完成的电子组装件的功能。

第二类：普通工业产品或专用的电子产品。包括电信设备、计算机和精密复杂的商业仪器、工业仪器。人们期望这一类设备能具有高性能、使用寿命长和不间断服务，但这不是关键的问题。某些表面缺陷是可承受和可接受的。

第三类：高性能电子产品。对于这类设备和产品，关键是能够连续操作或按照要求操作。医疗领域的生命维持系统或飞行控制系统是其中的实例。在这类产品中，最终的应用环境可能是极其恶劣的，所以不允许设备出现故障而停工。

每一类设备都有其单独的可接受性标准，并根据其各自的特征分为三个等级的质量标准。它们是：目标标准、可接受标准和不合格标准。

1）目标标准：它是接近完美的标准，是想要达到的标准，但不是总可以实现的标准。在其操作环境中，对于保证板子的可靠性甚至可能不是必须要达到的。在过去，它被认为是“完美的”。

2）可接受标准：这是不要求达到完美的标准，它可以使板子在操作环境中保持完整性和可靠性。可接受标准可以适用于一类或更多类的产品，但是可能不是对于所有的类型都是可接受的。

3）不合格标准：这个标准意味着在其操作环境中不足以保证板子的可靠性。不合格标准对于至少一类或更多类型的产品是不可接受的，但当它满足验收标准时，对其他类型的产品也认为是可接受的。

使用者有根本的责任鉴别被评估产品的类型。普遍的做法是根据每一种类型的板子的要求准备说明书，该说明书必须严格地与它的用途以及消费者关于质量和可靠性的要求有关。任何要求最终都会直接或间接地造成印制电路板成本的增加。然而，接受或拒绝的决定必须以可应用的合同条件、图形、说明书、标准和参考文件为根据。

14.6.2　组装印制电路板的检测

为完成印制电路板检测的要求，已经产生了各种各样的检测设备。自动光学检测（AOI）系统通常用于成层前内层的测试；在成层以后，X 射线系统监控对位的精确性和细小的缺陷；扫描激光系统提供了在回流之前焊盘层的检测方法。这些系统，加之生产线直观检测技术和自动放置元器件的元器件完整性检测，都有助于确保最终组装和焊接板的可靠性。

然而，即使这些努力将缺陷减到最小，仍然需要进行组装印制电路板的最终检测，这或许是最重要的，因为它是产品和整个过程评估的最终单元。

组装印制电路板的最终检测可能通过手动的方法或由自动化系统完成，并且经常使用两种方法共同完成。“手动的”指一名操作员使用光学仪器通过视觉检测板子，并且作出关于缺陷的正确判断。自动化系统是使用计算机辅助图形

分析来确定缺陷的，许多人也认为自动化系统包含除手动的光检测外所有的检测方法。

X射线技术提供了一种评估焊料厚度、分布、内部空洞、裂缝、脱焊和焊球存在的方法（Markstein，1993）。超声波学将检测空洞、裂缝和未粘接的接口。自动光学检测评估外部特征，例如桥接、锡熔量和形状。激光检测能提供外部特征的三维图像。红外线检测通过和一个已知的好的焊接点比较焊接点的热信号，检测出内部焊接点故障。

值得注意的是，已经发现这些自动检测技术对组装印制电路板的有限检测不能发现的所有缺陷。因此，手动的视觉检测方法一定要和自动检测方法联合使用，特别是对于那些少量的应用更应如此。X射线检测和手动光学检测相结合是检测组装板缺陷的最优方法。

组装并焊接的印制电路板易存在以下缺陷：

1）元器件缺失；

2）元器件故障；

3）元器件存在安装误差，未对准；

4）元器件失效；

5）沾锡不良；

6）桥接；

7）焊锡不足；

8）焊料过多形成锡球；

9）形成焊接针孔（气泡）；

10）有污染物；

11）不适当的焊盘；

12）极性错误；

13）引脚浮起；

14）引脚伸出过长；

15）出现冷焊接点；

16）焊锡过多；

17）焊锡空洞；

18）有吹气孔；

19）印制线的内圆填角结构差。

14.6.3 检测技术

14.6.3.1 视觉检测

视觉检测包括用肉眼对印制电路板性能进行研究和检查。人对物体产生视觉

感受大约需要 1s 的 1/500th[⊖]，即使它是不完善的或模糊的也是如此。人的视觉完全不同于机器，机器看线和空间不产生任何想象，而人通过视觉看物体，能够很容易的发现物体中的变化。此外，人类能容易地适应新状况、传达观察结果、执行其他的操作和纠正问题，人类也有能力发挥想象力改进设备和工艺。因此，这是对人类能力的充分挑战。

然而，对外部属性进行的视觉检查更适宜用 1.75 倍的放大倍数。如果用肉眼不容易发现缺陷，可使用最高 40 倍的放大倍数。对于尺寸的测量，例如间距或导线宽度，有时需要使用放大设备。对镀通孔的金属箔和完整性的检测需要 100 倍的放大倍数。对于显微剖切缺陷的观测，例如胶渣，根据其性能需求用 50～500 倍的放大倍数。总的来说，视觉检查的最小放大倍数应该是 1.75 倍，最大的放大倍数应该是 10 倍。能够通过视觉容易进行的检测可分为不同的种类，这些将在下文中叙述。

14.6.3.2　尺寸检测

尺寸检测包括对电路板参数的测量，确定这些参数值是否符合功能需求。视觉检测是通过肉眼或放大工具完成的，尺寸检测一般使用标准尺、测量显微镜、联合纵坐标测量设备、微欧表和 β 射线反射型测厚计。

为了完成尺寸检测，需要准备抽样检测方案，收集数据，并进行统计分析。通常，抽样检测方案根据可接受性质量标准制定，这些标准规定了检测产品满足统计学原理所允许的最大缺陷百分比。

14.6.3.3　机器观察

随着小型 SMD 和通孔元器件的大量使用，印制电路板的组装变得越来越复杂。多引脚的 SMD 和通孔元器件的引脚间距显著减小。此外，我们使用的大量各类元器件的引脚接入时间多数都要求短。

这种复杂性给整个制造工艺提出了一个挑战。由于发生故障的机会显著增加，以及手动检测中人类自身固有的局限性，这一挑战对于质量和检测过程尤为严格（Qazi and Calla，1997）。

机器观察是针对这些挑战的一个解决办法，它减小了复杂性在检测过程中产生的不利影响。这种方法从 1987 年开始试用，并由来自于工程和制造业的有经验人员组成的交叉功能观察团队推进。

这些观察系统能够检测到的缺陷被划分为两类：布放缺陷和焊接缺陷。大多数布放缺陷和焊接缺陷可被识别，其检测的可靠性高达 99%。

布放缺陷是指元器件或焊盘上引脚的定位问题。通过观察系统可以检测的布

⊖ 本书此处原文似有误，译者认为“1s 的 1/500th”中的“th”应去掉，即应为“1/500s”。——译者注

放缺陷包括元器件的缺失遗漏、歪斜、未对准、叠放、失效、翘起及弯曲或引脚翘起。焊接缺陷指焊接点的性能和质量。焊接缺陷可通过观察系统发现，包括桥接、开路、焊锡不足、焊锡过多形成焊球、浸焊为沾锡和冷焊接点。在一系列工艺改进的所有关键环节，这两类缺陷的检测都提供了大量信息，确保缺陷能被有效地检测到。

最后需要说明的是，观察系统可以进行在线或离线检测。在线检测增加了反馈过程，可直接在线进行焊接前的修补；离线或单机检测对新工艺的开发提供了灵活性和战略运用，因为主要的目的不是缺陷的“投影”，而是使用这个系统作为改进加工过程的工具。机器观察是一种获得视觉图像的技术，使用电荷耦合器件（CCD）照相机和专业化高亮度照明设备使插件的相关性能得到最好的突出，例如焊接点和元器件性能。图像被捕获，以数字形式存储起来，并通过观察系统计算机进行高速处理。通过对图像复杂的算法分析，从而确定缺陷是否存在。因为图像的获取是通过光学的方法得到的，并且计算机是根据亮度色标进行分析的，所以计算机必须能识别出缺陷的信号特征，也就是一些可以通过算法辨别的有缺陷焊接点的光学特征。图 14-9 是一个分立元器件缺失的图像，而图 14-10 显示的则是紧密引脚距元器件上弯曲的引脚。

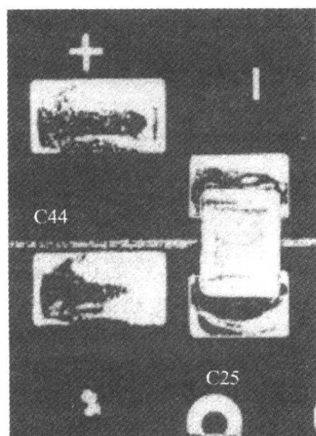


图 14-9 分立元器件的缺失
（经 Qazi 和 Calla 同意采用，1997）

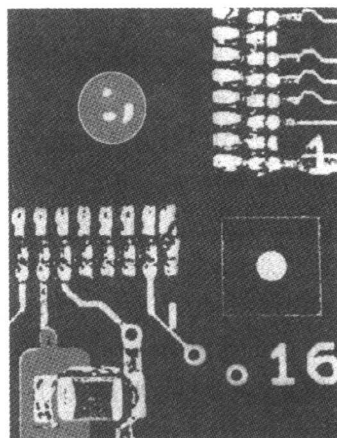


图 14-10 紧密引脚距元器件上弯曲的引脚

紧密引脚距元器件的分析需要一个小视场（FOV）。这个小视场为 10.16 ~ 12.7mm，因而产生了高分辨率。精确度为 ±0.0254mm 的高精度 x、y 坐标系用于照相机定位。

观察系统依赖于一些形式的数据库，例如计算机辅助设计文件确定检视窗的

放置位置，会便于图像的捕获和分析。通常，每个焊接点至少需要一个检视窗。典型的印制电路板在每一面上可能有 5000 ~ 6000 个焊接点，因此观察系统的编程人员至少要产生同样数量的检视窗。

X 射线和激光自动检测系统也提供了和观察系统类似的优点，它们也被用于弥补测试和检测能力。

Vernon（2003）评论了电子学和印制电路板检测工业中机器观察当前的状况和未来的趋势。用观察检测系统进行样品检查，支持产品开发或专门对故障进行分析研究。然而，图像评估总是需要经验和可用的规范。目前，图像评估可用的软件包具有足够的知识支持操作员，能够快速、客观地给出结果（Neues，2002）。

14.6.3.4 X 射线检测方法

X 射线检测系统利用了 X 射线传播原理和图像处理技术，这种方法根据焊料中的铅阻挡 X 射线的性能来保证焊接点的完整性。X 射线检测方法与系统还可以筛选出起短路连接作用的锡渣和停止流动的焊锡流，甚至在球栅阵列封装中也可检测到。它们更适合于加工或实验室应用，包括对功能故障或现场故障的检测。这一系统特别适合于在困难条件下检测诸如球栅阵列元器件的开路之类罕见的错误类型。X 射线自动检测方法是发展最快的筛选技术，并且是既能从数量上又能从质量上评估焊接点完整性的惟一方法。

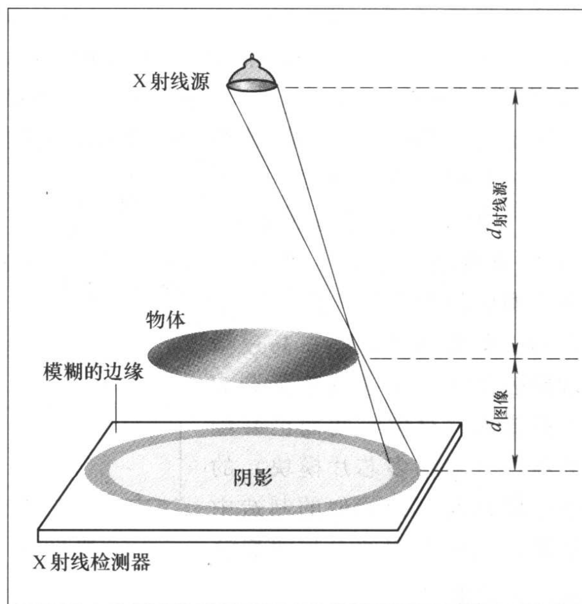


图 14-11 X 射线产生的放射线透视图像（经 Zweig 同意，1996）

虽然一些厂商使用薄膜基的 X 射线检测系统生成 X 射线图像，但是大多数厂商使用荧光检测法或实时系统，可以对视频监视器提供即时反馈。任何类型的系统发射出 X 射线光束，穿过板子，产生放射线透视图像，该图像的清晰度和放大倍率受到几何因素的影响，与自然光源或人工光源照在物体上一样。产生的放射线透视照相取决于影响阴影的清晰和放大倍率相同的几何因素。阴影的清晰度取决于光源的尺寸和它与这个物体的距离，如图 14-11 所示。

对X光摄影得到的是一幅二维图像，揭示了板子内部的三维解剖。正如放射线学者为了严格解释二维医学X射线图像必须了解人体的三维解剖[㊀]一样，工业X射线系统的使用者必须了解多基板的结构，以便正确解释X光摄影中显示的不同灰度影像（Zweig，1996）。

然而，X射线检查系统一般不适合生产线应用，因为系统的检测能力比典型的生产线低——每秒30～50个焊接点。对于整个板子来说，如果整个电路板的生产线速度是20s或30s，那么X射线系统就达不到要求的生产检测能力，不能完成100%的线路检测了（Tong，2003）。

微X射线分层摄影法（见图14-12）用X射线成像，显示薄多基板结构的内在详细资料，例如球栅阵列和印制电路板。它允许测量10μm小薄片的层间信息，很容易检测到可疑焊接点、脱焊和砂眼。这个技术的精确性同医学上所用的X射线断层摄影术系统（CAT扫描）一样，而且具有更好的分辨率。由美国M/s微光子学公司（www. microphotonics. com）生产的具有高分辨率的三维可视化的小型X射线扫描仪可用于这种检测。在20s的扫描时间内，计算机可同时分别进行20层的检测，在90s的扫描时间内，可检测80层。该仪器可应用于球栅阵列、倒装芯片、印制电路板和其他微型元器件缺陷的非破坏性检测。

通过在电路中检测很难捕获到的三个加工中普遍的故障是：①旁路电容缺失/错装；②集成电路电源引脚的焊锡开路；③地回路的引脚焊锡开路。在高速微处理器装配中，这些故障会造成重大的影响。对位于两面已装配好元器件（包括多芯片模块）的这些故障以及其他相似的制造中的故障，三维X射线分层摄影法都有能力拍摄到。

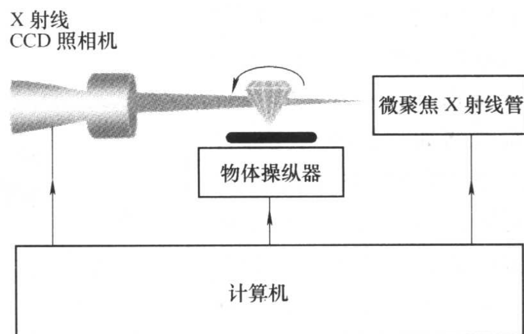


图14-12　微X射线分层摄影原理

X射线检测仪的构成包括一个聚焦很好的密封的X射线管、一个精确的采样操纵器、一架X射线CCD照相机以及一个可在Windows 2000/XP操作系统下运行的X射线断层摄影术软件的双奔腾处理器工作站。X射线源为8kV，0～100μA，光点直径小于8μm。X射线探测器是一个带28～65mm镜头、集成了768×512像素、8bitCCD的闪烁器[㊁]。

㊀ 即“人体骨骼”。——译者注

㊁ 闪烁器，是一种当受到高能微粒或光子冲击时会发光的物质。——译者注

14.6.3.5 自动光学检测（AQI）

自动光学检测仪正在被越来越多地应用在印制电路板生产流程中，并连接到计算机集成制造系统中。图 14-13 给出了生产流程中需要放置 AOI 的地方，并且说明了怎样将板子的信息与设计数据库中的数据资料进行比较，以便快速检测到任何生产阶段出现的问题。为了实现这个目的，希望在整个生产过程中都能尽可能早地获得参考数据。例如，如果自动光学检测是通过与“黄金板”[1]逐点比较的方法实现的，那么出现在板子生产上游阶段的缺陷将不会被检测到。一个更好的方法是使用光学绘图仪作为参考，但是这将不能检测到由检测光绘图仪或与它有关的软件引入的错误。最好的方法就是使用 Gerber 数据输入到光学绘图仪中，这样检测到的任何缺陷都是源于原始 CAD 数据和实际的板子之间比较的过程的。而这一过程依靠过去的处理运算很容易做到。逐点比较法需要多边形转换，这个转换可能需要大量的处理时间和数据存储。网络表比较则需要较少的数据，处理时间也可能更短。网络表比较技术依靠从图像中提取网络表，以便只有需要网络表被比较。

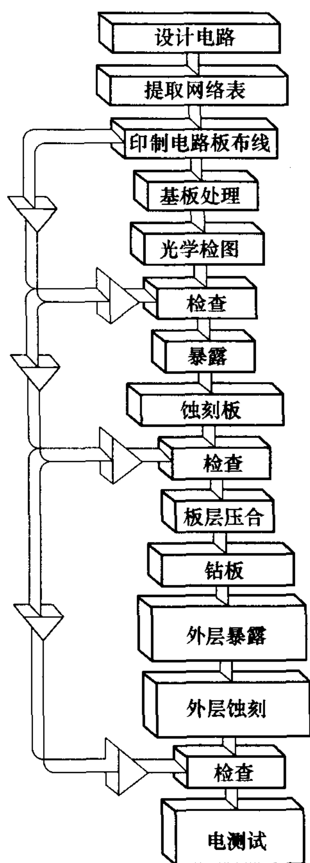


图 14-13　生产流程中自动光学检测仪的放置

当前，典型的自动光学检测仪系统的框图如图 14-14 所示，可使用 CCD 扫描仪，也可使用激光扫描仪。在 CCD 扫描仪中，使用一个合适的照明系统，通过一个光敏硅片检测照在板子表面的光。在激光扫描仪中，激光点在板子的表面进行机械扫描，使基材发出荧光。被探测器检测到的荧光信号提供了板子的图像。这种技术的主要优点是满足了板子的照明需求，用这种方法可提供铜箔和基材之间有用的对照。然而，它也有许多缺点。因为检测的是基层而不是铜层，所以检测不到碟形下陷，这些下陷可能延伸到几乎一直穿过铜箔。激光扫描仪不能检测到像聚四氟乙烯、陶瓷和玻璃这类将来可能变得更普通的不发荧光基板。另外，这项技术使用了昂贵的且相对较脆的器件，例如激光器和旋转棱镜。

[1] 黄金板，指优质的、可用作标准的板子。——译者注

激光扫描仪的上述问题限制了激光扫描仪的使用，然而 CCD 扫描仪则对此有所改进，广泛用于传真机和摄像机中。如今，设备的速度比前几年增大了 10 倍，灵敏度也比几年前增大了 100 倍。这极大的简化了照明问题，即使是最难处理的材料，也有多重设备为其提供色彩辨别。

数据处理器是下一个被考虑的单元。由扫描单面板产生的数据量非常大，以至于传统的软件化处理器对于一些庞大的命令处理太慢，不管这种处理器的速率如何改进，在可预知的未来中还将保持这种情形。

现在已经尝试使用处理器矩阵来解决这个问题，每台处理器处理图像的一小部分，但是这样的解决办法已经证明即昂贵又缓慢。一个更加有效的解决办法是流水数据处理器，它可以使数据流过一整套电路，以组装线的方式在每个电路中都完成一些小的操作。如果由控制处理器（它是一台常规的计算机）命令每一个电路应该完成什么样的操作，那么就可能使用相对少量的电路类型来处理不同的电路图形，并且保持高度的适应性。

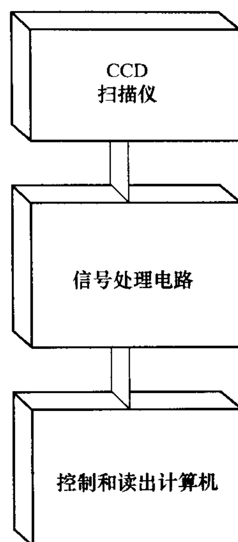


图 14-14　自动光学检测仪的基本组成

这一方案中最后一项考虑的是控制和与计算机的人机接口。这一阶段将完成软件数据压缩末级的一些程序，并提供为数众多的工具来帮助组装和测试。系统的这一部分将受益于标准计算机设备性价比性能的改进。

在组装印制电路板的自动光学检测中，使用正确的图像处理技术是极其重要的。影像采集卡提供处理和加工由照相机捕获的图像的能力。图像处理器也可处理彩色或灰度图像。显然，彩色图像处理器是首选的，因为它有能力处理真实的图像颜色而不减少细节（Fishburn，2002）。

一些自动光学检测系统可扫描和识别与参考的“黄金板”明显不同的元器件。只有可疑的元器件才会引起操作者的注意，并以扩大倍数为 10 倍的高分辨率显示。操作者仅对这些项目用一套软件工具检查，这样生产力可提高 4 ~5 倍。这项技术被称为“例外检查法”，其注意力集中在差别上而不是在相似之处。系统可能发现的故障有：元器件缺失、元器件颠倒、极性标记、桥接、布放缺陷、元器件失效、叠放、偏斜和没有负载等（www. testronics. com）。

可用的高复杂光学检测系统使用的是光学纤维光源，并且装备了精确度极高的用于托举已组装好的印制电路板的 x-y 工作台（Zarrow，2000），这种仪器叫 ERSAscope 3000，它有超过 30 个内在的透镜，并且放大倍数高达 35 倍，它还包含一个能提供 90°观测角度的棱镜。沿着元器件扫描，可以逐排地检查焊接点。由于调整了视场，所以能够看到内部的互连并且进行评估。所有这些都通过一架合成

到显微镜中的高分辨率的 CCD 彩色照相机投射到一个平面显示器上。

在如今的印制电路板组装中，自动光学检测（AOI）和自动 X 射线检测（AXI）是最广泛应用的检查放置缺陷和焊接缺陷的技术。因此，了解每一种技术可以检测的缺陷类型是很重要的，这在表 14-4 中已给出（www. agilent. com/go/manufacturing）。

表 14-4　AOI 和 AXI 的比较

AOI	AXI
极好地检测放置缺陷——元器件缺失、偏斜、极性错误、标记等	极好地发现那些通常能引起潜在的工作故障的焊接点缺陷
极好地检测元器件放置的精度（预回流）	极好地检测焊锡厚度
能检测到许多明显的焊接点缺陷	能够检测 AOI 和人工检测不到的焊接点缺陷
能对专门的处理进行检测和反馈（加速粘接、加速放置、加速焊接）	能在一个检测周期中对双面板的两面进行检测
典型的编程时间少于一天	典型的编程时间为 2 ~ 3 天
投资总额低于 AXI	投资总额高于 AOI

为了满足测试的需要，如今对于复杂的和高节点数的印制电路板，制造商们正采用多种类型的测试系统进行精确地检测、诊断并修复产品的故障。多样测试类型环境结合两个或更多不同类型的印制电路板检测器，其中一种方法是结合 X 射线自动检测、传统的在线检测和功能测试技术（www. techonline. com）。这个方法凭借每种测试技术最佳化故障检测，并且使测试的冗余性减到最小。例如：

1）X 射线检测可识别制造的焊接缺陷，例如短路、开路、焊锡不足或过量。

2）在线检测测试元器件的类型、定位和工作；减少全部需要的连接节点和装置探针数量，使装置问题和重新测试次数减到最小。

3）功能测试主要是检验印制电路板的全部操作，并通过先前的测试步骤使板子的故障发生率更低，而产量更高。

14.6.3.6　红外线热成像系统

尽管有各种各样的测试和检查系统可以利用，但是可能缩短使用寿命的元器件和组装故障也许并不能被检测。然而，对组装电路板的红外线成像则有可能减轻少量元器件和组装部件寿命的缩短，潜在地代替/减少了当前流行的电子测试以及另外一套可供选择的方法——传统测试。著名的热敏成像技术是把物体（例如印制电路板）发射的热量转换为可视的、动态的类似电视的画面的过程。这个画面可借助于红外线机械扫描系统或利用能进行电子扫描的相控阵检测器原理获得。通过检测，产生一个二维的物体表面的温度场（温度记录图），这样温度信息就可以从视场几千个点中获得，并通过监视器显示出来。

光谱的红外线部分从 0.7 ~ 1.3μm 为近红外线，从 1.3 ~ 3μm 为中红外线，超过 3μm 到微波波段为热红外线。热红外线直接产生热觉，而近红外线和中红外线的能量则达不到。红外线成像照相机（带有光电子传感器）可捕获从所有的物体上发射出的与它们的温度和原料特性成比例但却看不见的红外线能量。

红外热图系统利用红外线照相机，即使在周围环境温度低至 0.2℃时也可以检测到温度的差别。图 14-15 为一种用于印制电路板缺陷分析的典型热成像系统。通常，使用递减法查找缺陷的位置，它包括扫描在测单元（UUT），然后，从标准的黄金板图像中递减，并显示差别。利用合适的分析软件，这种减法运算可以自动加亮普通类型故障，并生成故障报告。

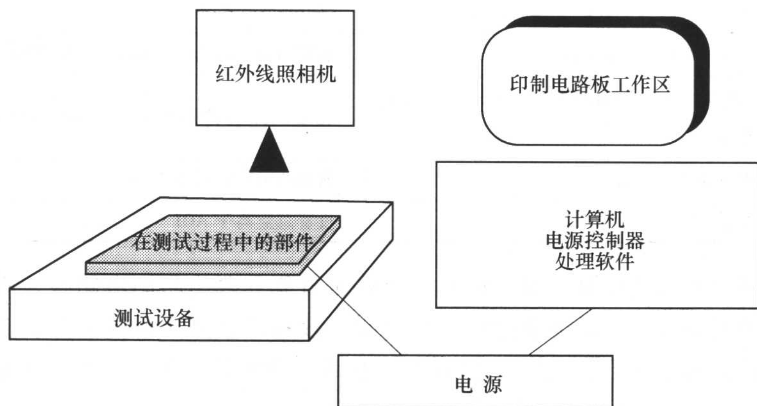


图 14-15 红外线数据采集系统（www.infrared.com/images）

14.6.4 验收标准

14.6.4.1 基材

视觉检查可以用来检查基材的若干主要性能，如下所述：

1）类型和制造商：必须检验基板的指定类型，并且由认可的制造商提供。

2）表面缺陷：视觉检查可用于查找以下表面缺陷，如图 14-16 所示。

① 空洞（局部区域材料短缺）；

② 凹痕（传导电铜箔的下陷，通常对铜箔厚度的减少不明显）；

③ 凹陷（导电材料的下陷，没有穿透总的厚度）；

④ 裂缝（导电材料不连续）；

⑤ 表面光滑（表面有焊锡球、焊锡突点等，其他不光滑）；

⑥ 针孔（覆盖材料整个深度的小孔）。

通常，表面缺陷是次要的缺陷，对功能的影响很小甚至没有影响。然而，在一些区域它们的存在可能是有害的，例如板子边缘连接的区域。对存在以上任何

一个或更多的表面缺陷的印制电路板的接受/拒绝需要检查人员根据相关的参考标准决定。

1. 起泡和分层

在层压基板的任何层之间或在基材和铜箔之间的局部分离或隆起，叫做起泡。起泡通常在基板中有明显的气泡，如果气泡小并且离镀孔较远，则是可接受的。

分层是指基材层间分层或基材和铜箔之间分层，或两者都有，它通常是不可接受的。

总的来说，起泡和分层被认为是主要的缺陷。通常，在组装过程中，分层或起泡区域很有可能加剧成品电路板的分离。

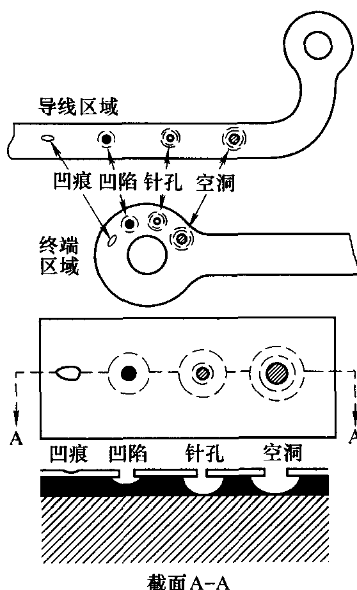


图 14-16 一些常见缺陷（经 Coombs 同意重绘，1988）

2. 白点

白点是玻璃布增强层压板中的一种典型的缺陷，在这种层压板中，玻璃纤维在其织物交织点处与树脂分离。它通常以离散的白点或横穿基板内部的形式出现。一般情况下，白点对于成品印制电路板的功能性能没有太大的影响，因此在一定程度上是可接受的。

3. 白圈（晕轮）

白圈是由于机械加工引起的基材表面上或表面下的破坏或分层现象，通常表现为在孔周围或其他机械加工部位的周围呈现泛白区域。

如果严格按照规范，白圈是不可接受的。然而，许多情况下，如果白圈距离机器制造边缘大约在 1.0～1.5mm 以上，则是可以接受的。

4. 织纹显露

这是玻璃布增强基板中一个典型的表面状况，玻璃纤维织布没有完全被树脂覆盖。因为显露的玻璃纤维束可以允许湿气的侵入和加工中化学制剂的残留，所以织纹显露被认为是主要缺陷。如果材料的剥离强度仍然良好，那么在一定程度上是可以接受的。

一种更为严重的情况就是纤维显露，在这种情况下，基材中的半束缚纤维断裂并暴露。这是一种主要缺陷，带有这种缺陷的板子通常是不可接受的。

5. 外形尺寸

板子外形尺寸的检验是较为重要的，应确保外边界尺寸在图画要求以内。印制电路板的尺寸不够大和超出范围都不符合要求，会影响其功能。通过使用简单的标尺、卡钳或数字测距工具，能测量或检验外形尺寸。

6. 边缘修剪

板子的边缘应该适当地修剪，应当没有毛头、碎片、凸出、散落的纤维等，并控制在一个很小的程度范围内。

7. 板弯和板翘

板子背离平面，自身呈现柱面或球面弯曲，称为板弯。对于矩形板子，它的四个角在同一平面上，如图 14-17 所示。

在另一方面，板翘是指矩形薄片沿对角线的变形，其中一个角与其他三个角不在同一个平面内。如图 14-18 所示，点 A、B 和 C 与底部相连接，而 D 翘起，这被称为板翘。测量板弯或板翘的测量方法通常有两种：

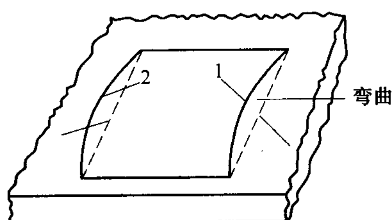


图 14-17　板弯

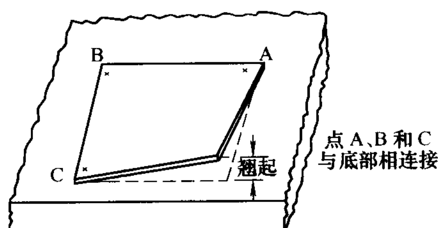


图 14-18　板翘

1）测高法；

2）测隙法。

根据图 14-19，可以计算出板弯百分比

$$\text{板弯百分比} = \frac{(R_1 - R_2) \times 100}{L}$$

式中，R_1 表示用千分尺测量的最大垂直位移；R_2 表示用千分尺测量的样品厚度；L 表示样品的对角线（矩形板），对于非矩形板，L 则表示位移角之间的对角线。

板弯和板翘可允许的百分比与板的厚度有关。表 14-5 中给出了厚度代码。

根据这个表，可以确定板弯或板翘的值。例如，2% 板弯和板翘意味着 0.02 × 板厚（mm）。

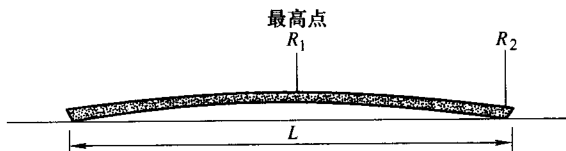


图 14-19　板弯的测量

14.6.4.2　导线分布图的完整性

导线分布图的完整性是指导线的质量与完备情形，用于确定导线宽度是否在公差允许的范围之内，外形是否满足图形要求。确定导线分布图完整性的最容易的方法是将正片或负片放在成品印制电路板上。

表 14-5　板子的厚度代码　（单位：mm）

厚度代码	板厚标称值
T1	0.2、0.5、0.7、0.8、1.0
T2	1.2、1.5、1.6
T3	2.0、2.4
T4	3.2 及 3.2 以上

1. 导线宽度

导线宽度对导线的电性能有直接的影响，当在导线宽度减小时，其电阻增加，载流能力降低。最大的导线宽度必须确保相邻导线的最小间距不会引发电路问题。

导线宽度的测量在显微镜或 25μm 分辨率的光学比较仪下进行。如图 14-20 所示，通常在导线上最宽的点处测量导线宽度，导线要从上方垂直观测。

当测量印制电路板导线宽度的可接受性时，要遵守 IPC-D-320 中规定的加工公差，当铜箔厚度 ≥ 1oz 铜时，公差为 0.04mm。另外每增加 1oz 铜，导线的每一边可增加 0.03mm 的变化。

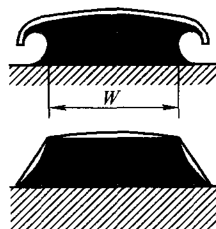


图 14-20　导线宽度

2. 导线间距

邻近导线的边缘之间（不是导线中心线之间）的距离，称为导线间距。为保证导线/电路之间充分的绝缘，适当的分开是必需的。间距的减小可降低任何两个导线之间的电绝缘。如果间距太小，板子应该用光学比较仪检测，并且使用绝缘电阻测试仪测量其电绝缘性。

导线的横截面宽度通常是不统一的，因此应该测量导线和/或焊盘之间最靠近的点。当确定导线间距时，应该考虑蚀刻浮空。

短路是指在导线之间的有害连接，以及由于导线之间的铜的凸出或没有被蚀刻的小片区域而导致的绝缘击穿，它们通常能通过视觉或光学比较仪观测到。用万用表检查绝缘性，能进一步证实电路短路。根据大多数规范，有短路电路的板子通常属于不合格产品，然而如果引起短路的铜箔很小，可使用划片刮掉。

开路电路是指导线缺乏连贯性，通常用欧姆表确定。有开路电路的板子通常是不合格的。可通过简单的焊桥修补开路的电路板，这在专业的电子学中是不可接受的，因为这种连接的可靠性太差。

3. 刮伤（轻微的表面阻剂或切口）

如果刮伤穿过一条或更多条的导线，则是不可接受的。

4. 刻痕

刻痕是指导线宽度上的局部明显变形，其长度不超过导线的平均宽度。如果刻痕不超过导线宽度的 1/3，则通常是可以接受的。

5. 凸出

凸出是指导线宽度上的局部明显增加，它的长度小于导线的平均宽度。

6. 空洞

空洞是指导线分布图上铜箔被错误地蚀刻掉的区域，或者甚至是在最初的基板上铜箔就缺失的区域。如果它们相对较小，那么在很大程度上是可以接受的，如图 14-21 所示。

如果空洞很小，则被称为凹陷。

7. 结瘤

结瘤是指金属性涂层的异常增大，看起来像个小金属球，它通常是电镀缺陷。如果它们被稳固的附着在金属上，并没有掉落的倾向，则是可以接受的。

8. 边缘清晰度

边缘清晰度是指相对于最初的原图图形边缘复制的精确度。在高压电路中，不规律的导线边缘可能引起电晕放电。通过测量从波峰到波谷的距离可知边缘清晰度，如图 14-22 所示。边缘清晰度的可接受值是 0. 127mm。

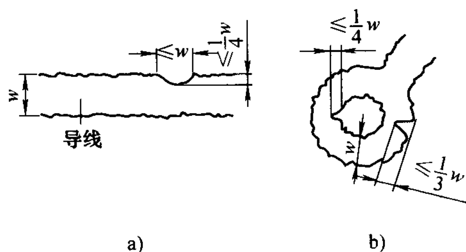


图 14-21　空洞可接受的限制条件

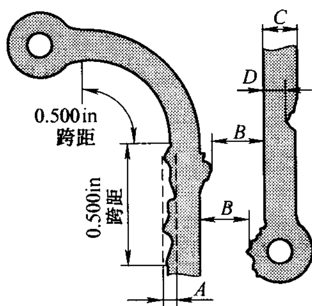


图 14-22　边缘清晰度

9. 齐平导线（贴平式导体）

导线的整个表面与其相邻的绝缘材料的表面处于同一个平面的一种导线，称为“齐平导线”。它用于转动开关、转换器和电位计，并且使用了滑臂（滑动片）和电刷。理想上，所有这类应用的导线应该是平齐的（即处于同一平面），以减少滑臂振动、磨损和噪声信号（见图 14-23）。然而，由于一些失配，在印制线与基板之间的允许步长则取决于滑臂的相对速度、所使用的材料以及在电路中可允许的电噪声的设计。通常，可以接受的高度公差如表 14-6 所示。

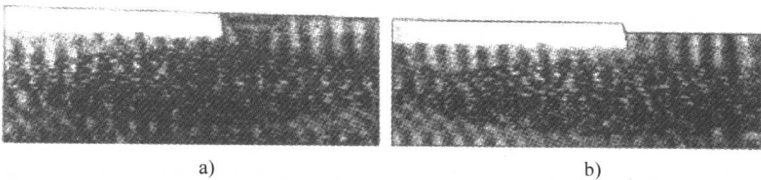

a)　　b)

图 14-23　齐平印制电路（经 Coombs 同意采用，1988）
a）推荐　b）不推荐，导线与电路板表面不平齐不能满足规定的公差

表 14-6　滑臂的速度

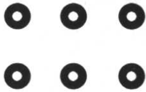
滑臂速度（最大值）/（r/min）	高度公差/mm
50	$2.032\times10^{-4}\sim5.08\times10^{-3}$
51 ~ 125	1.27×10^{-4}
126 ~ 500	0.762×10^{-4}

导线平齐程度的检测通常使用高度计或采用显微镜辅助的视觉检测。

10. 电流崩溃

这种测试用于确定在镀通孔中是否有足够的电镀以承受相对较高的电流。按照 IPC-TM-650 的建议，完成这种测试需要使用 10A 的电流持续 30s。该测试可以在一块实际的印制电路板上完成，也可在如图 14-24 所示的一个测试样品上完成。

测试通过下列简单的步骤进行：


图 14-24　典型的电流崩溃测试图（IPC）

1）把一个近似值的负载放在一个电流稳压电源的正负极之间。

2）把电源电流调节到期望值（10A）。

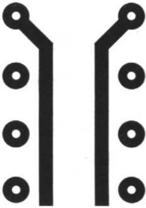
3）把电阻器的一端从电源的正极移开。

4）把需要测试的镀通孔接在电源的正极和电阻未连接端之间。

5）观测电路中是否维持着规定的电流。

11. 绝缘耐压

这个测试是检验绝缘材料和元器件间的间距是否足够的。根据板子的应用，分别在样本的实际绝缘元器件之间或在绝缘元器件与地之间施加 500V、1000V 和 5000V 不同的测试电压，电压被稳定地增加到给定值，持续 30s 后逐渐地减少，通过视觉查看样本的连接端之间的绝缘击穿或闪络。图 14-25 是一个典型的测试图形。


图 14-25　绝缘电阻、绝缘耐压和抗湿性测试图

这种测试主要是用于确定元器件能否在额定电压下安全工作，并能承受住由于电涌、制动操作等引起的瞬间过压。测试是破坏性的还是非破坏性的取决于过压的程度。测试的全部过程参见 IPC-ML-

950（多层印制电路板）和 MIL-STD-202（电子部件方法 301）中的说明。

14.6.4.3 孔

1. 孔径尺寸规范

孔径尺寸是指完成的镀通孔或没有电镀的孔的直径。孔尺寸的测量是很重要的，可以检验孔是否满足元器件引脚和装配硬件等所要求的合适的最小和最大值，以及适当的焊接空隙。孔径必须在规定的限定以内，特别是在自动组装中。通常，对于直径在 2.5mm 以下的孔，大部分印制电路板制造商可接受的容差范围为 0.1 ~0.15mm。孔径尺寸的测量使用一个适当的通过/不通过型圆柱塞规或光学方法进行。

2. 孔位置

孔位置的确定通常是以另一个孔或以板子的轮廓为参考的。自动安装元器件的板子的公差通常要求严格控制在 50 ~ 150μm 之间。

用一只电子数字型检位规或用一部显微镜可测量孔的位置。

3. 孔环（孔与焊盘的对准）

孔环是指完全包围孔的导电材料的位置，它主要是为电子元器件的引脚或导线的安装提供一个边缘区域。

对于大多数的孔，孔中心都没有精确地位于焊盘中心，因此可以接受的孔中心偏离焊盘中心所允许的最大值通常被专门指定，以达到可以接受的目的。图 14-26 给出了各种与孔环有关的术语。0.254mm 的孔环宽度是一个标准的要求，在特殊情况下孔环宽度可以小至 0.127mm。

4. 孔金属化

通过对一些孔的一个金相学横截面的检验实现镀孔质量的检测，核查镀孔的质量。使用显微镜进行测试，并且必须观察下面的因素：

1）所有涂层的最大厚度；

2）所有涂层的最小平均数；

3）非电镀区域的数量和位置；

4）结瘤的存在；

5）任何其他不规则的现象，例如裂缝。

这些性能应该与规范和/或厂商可接受的已达成协议的条款进行对比。

5. 胶渣

在钻孔过程中，可能会产生过多的热量，使孔中的树脂变软，并在暴露的铜上留下污物。这种情况可以造成内部焊盘和镀通孔之间的不连贯，从而产生开路，如图 14-27 所示。通过垂直和水平观察镀通孔的显微剖切面来检查胶渣。

6. 层间重合度

层间重合度用于测试一个图形与它预期的位置或是与电路板任何有关导线层

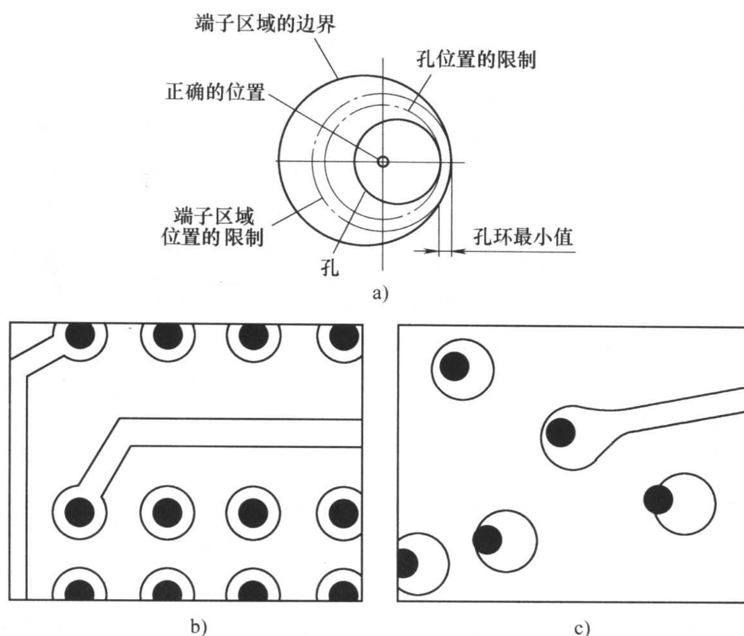


图 14-26　孔环

a）用于连接的环绕孔环的区域　b）好的：孔在焊盘中心　c）不好的：孔不在焊盘中心

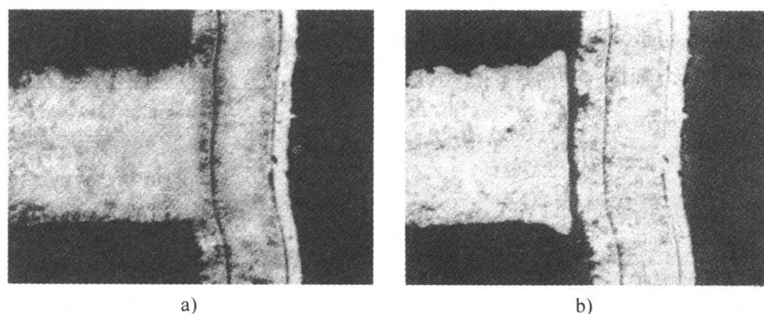


图 14-27　胶渣（IPC）

a）推荐：在板与孔的镀层间没有胶渣的迹象　b）不推荐：在内基板与孔的镀层间有胶渣的迹象

的一致程度。内层的未对准会导致阻抗的增加，而且严重的未对准甚至可能导致连贯性丧失和开路。只有正确的层间重合度，才能保证镀通孔和内层之间正确的电气连接。

下面列出了两种普遍使用的测量层间重合度的方法。

1）显微剖切评估法：它包括在垂直的镀通孔截面上测量每个内部焊盘面积并确定中心线。在这些中心线之间变量的最大值就是重合不良的最大值，如图 14-28

中的"C"所示，这是一种破坏性方法。

2）内层重合度：为了确保镀通孔和内层之间良好的电气连接性，内层的精确重合是必要的。重合不良会导致阻抗增加、传导性降低，严重时可造成电路开路。

通常用X射线法或显微剖切评估法测量层间重合度。X射线法利用X射线检测仪和偏光胶片进行测试，不具有破坏性。如果不能正确地观测到孔环，则会在胶片上精确显示出错误图像。

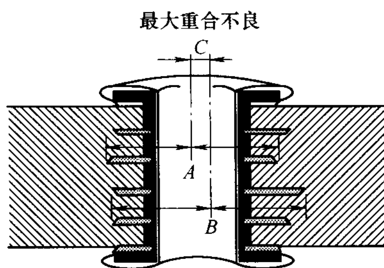


图14-28　层间重合度的显微剖切评估法（经Coombs同意重绘，1998）

14.6.4.4　蚀刻缺陷

1. 未蚀刻铜

在自动焊接过程中，没有被完全移除的铜区域可能产生网状物，因此可能被认为是不合格。另外，有时未蚀刻铜区域可能引起电路短路。

2. 凹陷

凹陷是一种小洞，可能出现在铜箔中或没有被抗蚀层充分保护的铜中。它们通常是可接受的，除非是在接触舌片上金属箔的腐蚀降低了电气连接才无法接受。

3. 侧蚀

侧蚀是一种蚀刻缺陷，应该指定其可接受的限度。侧蚀是指与板子表面平行的导线被测边缘上，从导线的外缘到同一边缘上最大缺口处的距离，如图14-29所示，侧蚀

$$u = \frac{B - b}{2}$$

式中，B表示导线的设计宽度；b表示导线的最小宽度；u表示侧蚀。

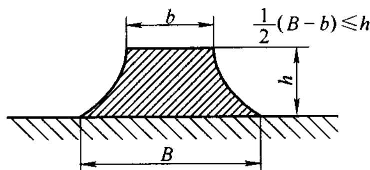


图14-29　未镀锡或焊接的侧蚀的验收限度

如果需要，一般采用测量直线距离的方法确定侧蚀。

4. 悬出

悬出是指导线一侧宽度的增加（如图14-30所示），它由电镀的堆积产生。通常可接受的悬出长度大约为悬出材料厚度的1.5倍或更小。然而，悬出过多可能会阻断导电图。

5. 回蚀

把非金属材料从孔的侧壁有控制地进行移除，达到一个指定的深度，这个过程称为回蚀，即移除胶渣，增大内部导线表面的暴露。回蚀所要求的最小或最大范围通常指定为0.00508～0.0762mm。图14-31说明了回蚀的构造。回蚀的程度可

使用多基板的显微剖切测量。

14.6.4.5　电镀（金属镀层）

1. 合金的构成

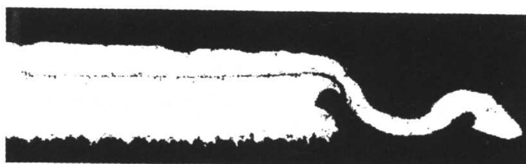


图 14-30　悬出范围大约是厚度的 10 倍（Coombs，1988）

在印制电路制造中普遍使用的合金是锡-铅或锡-镍合金。通常规定了它们的构成，例如当使用锡-铅合金时，规范中通常要求锡的含量在 50% ~70% 之间；假如是锡-镍合金，锡的含量通常是 65%。

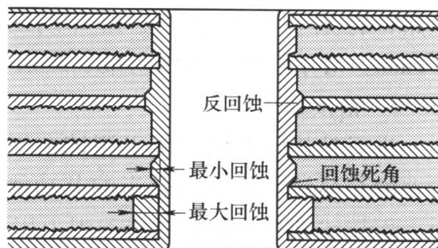


图 14-31　回蚀的构造（经 Coombs 同意，1998）

在电镀印制电路板上合金的构成可由湿法分析法、原子渗透试验法和 β 反向散射法检验。β 反散射允许非破坏性地检测合金的构成。

2. 厚度

通常规定了所有金属镀层的最小厚度。尽管有许多方法可以测量这些镀层厚度，其中使用最普遍的两种方法是使用显微镜测量的显微剖切评估法和 β 反向散射法。

3. 孔隙率[㊀]

孔隙率是测量的一个重要参数，当通过气孔的底部金属的腐蚀产生时，对任何电接触都可能有一个负面影响，特别是在接触舌片上。疏孔度的测量存在若干种方法，它们是电气化学、电图像和化学方法。然而，最普通的方法是电图像法和气态试剂测试法。

4. 接触电阻

接触电阻起一个重要的作用，特别是在印制电路板触点跳格设定上。一个不良触点可以产生电噪声。接触电阻的测量是通过记录在特定电流下该接触上的电压进行的。

5. 耐磨度

耐磨度提供了有关电镀破坏机理的重要信息，并可能有助于一种改良型涂层材料的设计。耐磨度是通过将某一试验样本与另外一个部件装配在一台可供这两个部件进行相对运动的设备上，用实验的方法进行确定的。这一组合体在给定时间内维持运转工作状态，直到故障发生为止。这种实验通常是在一间能够模拟周围干式腐蚀环境的测试房间中进行的，该干式腐蚀环境可能加速磨损。那些被测试的元器件可通过扫描式电子显微镜进行检测，以测定从一个接触面到另一个接触面迁移的材料数量。

㊀ 孔隙率，是指一种材料中孔隙的总体积与整个材料的体积之间的比率。——译者注

6. 附着力

确定电镀附着力的一种简单方法是仔细地观察显微剖切过程。假设附着力较差，则镀层将在显微剖切样本的制备期间内分开，在电镀界面上也将表现出附着力的不足。根据 IPC-TM-650 可知，电镀附着力还可以通过胶带试验测试。

7. 防焊膜

防焊膜用以保护那些未镀锡的铜印制线不受化学药品和研磨剂的损害，过去还习惯上用于对从一印制图案中挑选出来的区域进行遮掩以免焊料流动造成短路，特别是在波峰高温熔焊期间。这样的膜被丝网印制，且厚度通常是 0.1mm。对于防焊膜版面对准、皱褶和分层，进行适当的防焊膜检测。

8. 粘接强度

进行粘接强度试验用于测试在焊盘中基板的金属镀层的附着力。在焊盘中较差的金属镀层附着力会影响其功能性。通过显微剖切可检测金属镀层的附着力，而接线端拉力试验过去习惯上用于确定这种附着力。图 14-32 给出了典型的接线端拉力试验试样。

14.6.4.6　环境检测

每当要求高可靠的性能时，作为验收程序的一部分，通常要完成环境测试。环境测试将确保印制电路板在其正常使用时所易遭受到的气候条件下完成其设计功能。通常，环境测试不是在真实的印制电路板上完成，就是在印制电路板的抽样试验样本上完成。两种通常使用的环境测试方法是：热应力法和热冲击法。这些将在下文中详细叙述：

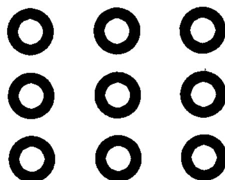


图 14-32　典型的接线端拉力试验试样

1. 热应力

温度引起的应变力可导致印制电路板的变形，这种变形在焊接期间会造成严重的问题，例如镀通孔、金属镀层或印制线脱落或层压板分层。热应力检验/试验通常在产品之上进行，以研究印制电路板在焊接后的性能变化。

通过将印制电路板放置在一个温度范围为 120～150℃ 的温控箱内 2h 进行除湿，随后将印制电路板放置在干燥器中的一块陶瓷板上进行冷却，并在温度为 287℃ ±5℃ 的焊锡槽中焊料熔液里漂浮和沾锡 10s，这样就产生了热应力。对长镀通孔进行视觉和显微剖切检测，可评估热应力的影响。

2. 热冲击

热冲击试验有助于确定印制电路板在处于最低温度和最高温度时的性能变化。通过使印制电路板处于典型值为 -60～+125℃ 的温度极值之间剧烈、高速地变化 2min，就会引起热冲击。热冲击的作用可能导致孔的金属镀层剥蚀以及分层。在热冲击周期内，当连续监视电路运行时，这些热冲击的作用在间歇变化的电环境下就会自己清楚地显现出来。一个典型的热冲击试验样本如图 14-33

所示。

3. 抗湿性和绝缘阻抗

进行这一测试是研究高湿度和高温度对印制电路板性能上的影响。通常，测试条件规定为温度 25 ~ 65℃时的相对湿度为 90% ~ 98%。在完成必要的测试操作过程后，则可测量出绝缘阻抗。这一测试结束后，测试样本应该不出现任何起泡、斑点、弯翘或分层。

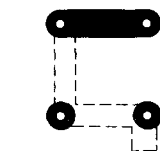


图 14-33　典型的热冲击和抗湿性试验样本（IPC）

14.6.4.7　其他性能

1. 清洁度

印制电路板制作应清除灰尘、油脂、油类、汗水或任何其他的杂质。通常，清洁度通过视觉检查来确定。

2. 焊接性

为了便于元器件与印制电路板的结合，用焊锡将印制图案弄湿的能力被称为“焊接性”。焊接性的测试可以使用不同的方法进行，并且同时建立了 IPC 标准。通过沾锡试验，可对印制电路板表面焊接性进行质量上的评估。对于镀通孔板，这种方法与适当降低（保持其水平）焊锡熔液上的印制电路板的熔化焊锡直接有关，焊锡的温度被恒温调节。使板子与焊锡保持接触，焊锡穿过通孔上升到顶面的焊接所花费的时间就给出了板子焊接性的一种测量方法。

3. 封装

应该对印制电路板的基本身份识别数据（如元器件号码、装配部件号码、订单号码等）进行检查。每一块印制电路板应该由一张波浪形的锡箔纸与其他的印制电路板隔开，而且不应该含有任何像金属性沾锡和灰尘等类似的杂质。

4. 批号

在印制电路板上寻找使用抗溶解的油墨丝网印制上去的批号是一种良好的习惯做法。假设在印制电路板上存在问题，批号则提供了一种有用的跟踪依据。印制电路板的批号及其可靠性可进行视觉检查。

5. 认证

如果达成协议同意由一家特别指定的机构提供板子的认证，那么这样的认证应该被标注在板子上。例如，由实验室签名同意的认证要求板子标注 XXXXX107，则 XXXXX 标准对印制电路板制造商代码和 107 而言就是一个经核准的过程。

14.7　几个常用标准

1）IPC-TM-650：测试方法指南。包含超过 150 个工业认证的测试技术和程

序，它们适合于所有形式的印制电路板和连接器化学、机械、电子及环境的测试。

2）PC/EIA J/STD-001C：电子和电子组件的焊接要求。描述生产优质的焊接互连和组装件的材料、方法和认证的标准。

3）IPC-A-610C：电子组装件的可接受标准。通过全彩色照片和插图说明工业界认可的电子组装件技术标准，包括元器件的定位，通孔、SMD 和分立配线组件的组件定位与焊接标准，以及机械装配、清洁、标记、涂层和基板的要求。

4）IPC/WHMA-A-620：电缆及线束配件组装的要求及接收标准。这是工业界认可的电缆及线束配件组装的要求及接收标准，包括导线准备、接线端焊接、模具弯曲和触点的成形加工与机械制造、绝缘体转换连接器、超声波焊接、拼接、连接器、模塑造型、同轴电缆/双股电缆、包装材料/带子、防护装置、组合件和线绕终端。

5）IPC-DRM-SMT-C ：SMD 焊接点评估手册。包含了片状元器件、翼型和 J 型接焊接点的三维彩色插图，也给出了对每种类型的元器件的未对准和最小焊接连接的最低验收条件。

6）IPC-SM-785：表面贴装焊接件加速可靠性试验导则。包括评估时使用的表面贴装焊接件加速可靠性试验导则，以及超额电镀时在电子组装件实际的使用环境中进行这些测试的结果。

7）IPC-9701：表面贴装焊接件性能测试方法与鉴定要求。对评估电子组装的表面贴装焊接件的性能和可靠性提供专门的测试方法，建立刚性、柔性和刚柔性结构电路中表面贴装焊接件的性能和可靠性标准。

8）IPC-PCB-EVAL-CH：印制电路板缺陷评估表。通过显微剖切鉴别电路板显露出来的缺陷，例如钉头电镀、裂缝、环氧树脂油污、反回蚀、电镀空洞、镀层厚度不足、分层、电镀皱折。

9）IPC-6011：印制电路板通用性能规范。规定了印制电路板的厂商和使用者的一般要求和责任，也制定了强制性的质量和可靠性保证的需要。

10）IPC-6012-A-AM：刚性印制电路板的鉴定与性能规范。包括单面板、双面板，带或不带镀通孔的板子，带或不带盲孔/埋孔和金属芯层的多基板。

11）IPC-A-600F：印制电路板的可接受条件。提供了印制电路板上可观察到的可接受的和不合格的对象的照片和插图，包括印制电路板的白边白角和裂缝、环孔要求、镀通孔的电镀空洞、柔性印制电路、导体箔层厚度和平展性要求。

12）IPC-QE-605A：印制电路板质量评估手册。包括各种不规则的和典型的印制电路板的覆盖层（如阻焊剂、镀通孔、印制线性能和表金属镀层）的照片插图，以帮助用户明确决定各种不规则电路板的验收标准/不合格标准。

13）IPC-TR-551：用于电子元器件安装与互连的印制板质量评估。评测互连产品和电子装配质量方面的技术方法纲要和使用技术，提出基材、导线的物理要求，内基板、结构、编号、镀通孔、元器件安装区域、清洁评估、阻焊层和印制电路板的电气要求。

14）IPC-2524：印制电路板生产数据质量评估系统。描述了厂商使用印制电路板制造数据质量定级体系评估输入数据包的完整性，也包括厂商和消费者设计规则一致性的信息，并能被印制电路板设计者用作输出质量检测的标准。

15）IPC-9151A：印制电路板工艺、容量、质量、可靠性（PCQR）试验标准和数据库。描述了对设计中指定的关键性能的制造能力进行评估的方法，以及由 IPC 制定的可接受的标准。

16）IPC-9191：实施统计过程控制（SPC）的通用导则。略述统计过程控制的基本原理、实施策略、工具和相关过程控制的技术，以及对成品性能的要求。

17）IPC-9199：SPC 质量评估。这个文献是使用者或厂商的内部审计部门根据 IPC-9191 的要求评估统计过程控制系统的工具。

18）IPC-9252：未组装印制电路板电测试要求和指南。制定了适应不同测试的标准，并帮助选择测试分析仪、测试参数、测试数据和必需的设备，完成对未组装印制电路板内层的电测试。

19）IT-97061：印制电路板通孔与焊盘的错位的原因和可靠性。讨论了错位的根本原因，推荐了适当的构架和一个完整无损的环孔的需求，以致力于在可靠的、高密度的印制电路板产品制造中有所帮助。

20）IT-98103：多基板内部无焊盘层互连和错位的可靠性。解释了互连结构、设计和相关的制造，以及它们对互连可靠性的影响。

21）IPC-MS-810：大批量显微剖切导则。针对从样本切除到微蚀刻的过程以及从一般到大批量显微剖切的变化，讨论了其中的多数变化和问题。

22）IPC-QL-653A：印制电路板、元器件及材料检验/试验设备的认证。这个规范确定了印制电路板、元器件及材料检验/试验设备的认证要求。这个规范对评估和审查技术导向检测/试验设备提供了最低的标准制度。

23）IPC-TR-486：内层分离的互连应力测试（IST）与显微剖切相关性联合研究报告。在镀通孔内层分离检测中，对发生热应力的地方进行互连应力测试。这个技术报告对互连应力测试的评估作出了一系列非常详细的研究。

第 15 章　印制电路板工业的环境问题

15.1　印制电路板工业的污染控制

制作印制电路板的过程中，在不同阶段都要用到大量的化学制剂。把包含有害化学制剂和污染物的溶液直接排放到排污管网是有关法规所明令禁止的，这是因为一些化学制剂是不能混合在一起的，否则它们会发生危险的化学反应，可能产生有毒的烟雾或强热。印制电路板工业所产生的废物是金属类的或非金属类的，废水中含有高浓度的重金属，如铜、铁、铬等，对有机体非常有害。

为了保护还没有意识到其危害性的民众，每个城市的管理机构都应该对有危害的污水和废物的相关处理制定严格的规定（SPITZ，1990）。这些规定通常是联邦法律，如果不遵守或漠视，将会受到严厉的处罚。

因此，印制电路板生产厂商必须采取措施减少废弃化学制剂的危害，使有毒物质含量降到最低，这不仅仅是必须做的，而且还应该有相当明显的效果。为了达到这一目的，那些污染管理机构应该进行彻底的研究，制定详细的条款，以便更好地遵守。从这些机构开出的合格证书应该达到这样的要求：① 废物的数量和毒性被最大程度地减少；② 使废物危害达到最小的方法得到广泛应用。

多数条例把污染物的浓度作为主要参数来考察条例是否被执行，然而有时候“重量”也被作为基本的指标，比如每天排放了多少磅的铜。铜的日排放量可以用排放的浓度（单位为 mg/L）和日产量（单位为 10^6USgal/天）来计算，这个关系可以用下面的公式给出

$$\text{铜的日排放量（lb/天）} = \text{浓度} \times 8.34 \times \text{日产量}$$

如果工厂预计的日产量和允许的排放浓度是已知的，那么污染物的精确排放量可以很容易地计算出来。

15.2　污染剂

制作印制电路板包含多种不同的工艺过程，可以广义的分为两类：干加工和湿加工。

干加工包括钻孔、裁切和成像。湿加工包括擦洗、显像、电镀和蚀刻等。几乎所有的湿加工过程所涉及的化学制剂都存在某种程度的危害（Breitengross，

1993），其危害性是由化学制剂性能决定的。例如，强酸有很强的腐蚀性，其蒸气接触到的大多数金属部件很容易被腐蚀。吸入这些蒸气会导致一系列的问题，比如引起呼吸系统轻微的刺激和肺水肿，过度吸入甚至可能是致命的。只要工厂引入合理的工程技术并推行管理制度，所有这些危害都可以减小甚至被消除。工程技术方面，简单地说包括适当的通风和材料的替换；管理制度方面应该包括恰当地制订标准操作程序（SOP）并对操作人员进行培训。

湿加工过程中所使用的有害材料大体上可以分为以下几类：

1）腐蚀性材料：包括酸、碱和卤化物。这些物质能够腐蚀它们所接触的材料，就像强含氧酸一样。

2）氧化剂：氧化剂能够很容易地使所接触到的物质氧化。一个典型的例子是氯气，它常被用于蚀刻系统中蚀刻溶液的再生。

3）有毒物质：众所周知，这是对人类有副作用的物质。这些物质有毒、有刺激性和致癌作用。例如三价铬、亚甲基氯化物和二甲基苯碱类物质。

在印制电路板工业管理中，最重要的是保护员工免受这些有害物质的侵害。可以通过培训、替换材料和改进工艺，特别是对废水进行处理和减小或杜绝化学制剂排放到蓄水池中来实现。

15.3　水的循环使用

在印制电路板工业的一系列制造过程中，有许多阶段会产生大量的污染物，产生的这些废物是金属类或非金属类的。如果废液中铜或其他离子的最高含量低于限定的标准，那么即可认为是低危害的非金属类废物。

减少污染的最好方法之一是限制水的使用。漂洗站使用的水量可以通过多个逆流式漂洗阶段而不是只有一个漂洗阶段得到控制，采用这种方法，废水将被减少到约为只有原来一个漂洗阶段时的1/3，这可以通过使用水流量控制器有效控制。

除此之外，应该在清理毛刺和擦洗阶段使用合适等级的过滤器，以减少排出水中铜的含量。通过这种方法，大多数的重金属能够被过滤出来。滤除掉这些重金属，排放的水通常已经可以再循环使用了。

污染最严重的工段之一就是电镀槽之后的漂洗器。为了减少把电镀溶液拖带到漂洗器中，可以把板子抬高到电镀槽上方的空气中，使那些溶液重新滴回到电镀槽内。借助气刀的使用，快速从板子表面除去那些多余的溶液，从而减少所耗费的时间，这些气刀可以减少约50%的拖带溶液。对于小型设备而言，广泛采用的净化处理漂洗用水的方法之一是将水收集，然后进行批量处理。在持续的过程中，重金属在被处理前已经被沉淀。

15.4　回收技术

早期的印制电路板工业认为没有必要进行金属回收，因为将废物交于他人处置的价格低廉，这样做似乎更为合适。然而，随着处置费用的上升以及垃圾填埋场地变得越来越少，金属回收受到了广泛的关注。

从电镀车间排放废水的总量是很大的，其主要的污染物是铜、锡、铅、氰、磷和其他金属。从不同工厂排出的污染物浓度也各不相同，这取决于工艺流程和所用的设备类型。

从蚀刻阶段出来的废物中含有大量的铜，其他污染物的含量取决于所使用的蚀刻剂。铬酸蚀刻剂是最难处理的，它们有剧毒且会污染水床。

废水来自于漂洗工段和时常更换的清洗槽。毫无疑问，印制电路板工业产生的废水中主要的金属当然是铜，这些铜的主要来源是清理毛刺、洗涤印制电路板以及随后的微蚀阶段的清洗槽与冲洗器。铜的回收有以下一些方法。

15.4.1　过滤

过滤系统被用来滤除清理毛刺和擦洗阶段漂洗用水中的颗粒物，从而可以减少排出水中铜的含量。过滤可以通过离心机、纸过滤器、沙土过滤器、重力装置等四种系统中的任何一个和过滤技术完成，每一种方法都有其各自的优点和缺点。通常，绝大多数重金属都能够被滤除，使得这些水百分之百可以再循环利用。

15.4.2　节水技术

减少废水中的铜的最好途径之一是通过逆流漂洗法限制用水量。在任何一个工厂中，减小水的耗费的最有效的技术是采用多个逆流浸泡过程，而不是只有一个漂洗过程。实践证明，采用这种方法后，废水的排放量将会减少到只用一个漂洗工段的1/3。最好使用流量控制器使水流保持在所希望的流速。流量控制器是弹性膜片型的，通过设定特定管道的尺寸可以达到特定的流速。通常，间歇的喷射式清洗被工厂用来减少整个用水量，然而喷射式清洗的效率取决于印制电路板的几何尺寸、水质和需要清洗的等级。

图15-1显示了逆流级联漂洗的原理，其中水流和印制电路板运动的方向相反，可以看到清洗浸泡的最后阶段在几乎洁净的水中进行。在净化处理漂洗用水上有几种可行的方法，对于较小的印制电路板车间，可能采用批量处理的方法，而对于大一些的工厂，则必须采用连续的处理工艺。对重度污染的漂洗用水，要经过重金属沉淀处理。

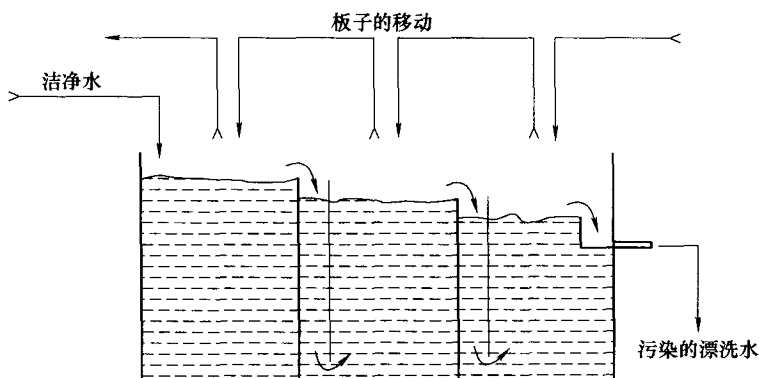


图 15-1　连续漂洗原理

大多数回收系统是依据已知的废液量和废液中金属的浓度来设计的。把板子从电镀槽中升高到空中，使板子上的电镀溶液恰好重新滴回到电镀槽内，这样可以减少板子拖带到漂洗阶段的电镀溶液。借助于升降机上的气刀可以节约滴落的时间。

对臭氧损耗问题，在国际关注之前，消耗臭氧的化学制剂在电子工业中广泛使用（Smith，1993b）。作为对预防污染行动的积极响应，各种不同的清洁处理方法有了进一步发展。Wilk（1994）阐述了另一种新的针对废水循环利用的清洁处理方法。

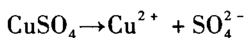
Miller（1997）曾说如果通过以高效漂洗、重覆用水为最低要求使用水量最小化，并对显影、蚀刻、漂洗溶液进行再利用，对重金属进行分离和回收，那么闭环或零排放系统是可以实现的。通过离子的置换反应，薄膜渗透和电解金属回收等技术联合使用可以实现金属回收、水的循环利用和废物最小化的全面设计已由 Harnsberger 和 Saloka（1994）提出。

Fulker（1992）论证了印制电路板工业中应用水洗和半水洗的净化系统处理废物排放的问题。这两种类型净化系统的经济性在其出版物中也可以看到。

15.4.3　离子交换系统

一种被广泛推荐的处理漂洗水的方法是采用树脂净化工艺，这是一种大家熟知的生产去离子水的工艺过程。专用的树脂可用来有选择性地吸附一种或几种渗透液体中的离子，并且用 H^+ 或其他非致污离子置换它们。另一方面，大部分的树脂在失效后还可以再生。

离子交换系统的原理非常简单，漂洗水通过两道去离子层去除阳离子和阴离子。它利用大多数在印制电路板产品中使用的水溶性化学物质可在水中电离的性能，形成阴离子和阳离子。例如



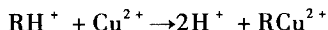
$$CuSO_4 \rightarrow Cu^{2+} + SO_4^{2-}$$

（阳离子）（阴离子）

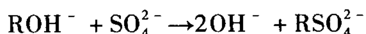
当漂洗水通过离子交换系统时，将发生下面的化学反应：

1）阳离子取代阳离子交换树脂中的氢离子；

2）阴离子取代阴离子交换树脂中的氢氧根离子（以后用 R 代表交换树脂）。



$$RH^+ + Cu^{2+} \rightarrow 2H^+ + RCu^{2+}$$



$$ROH^- + SO_4^{2-} \rightarrow 2OH^- + RSO_4^{2-}$$

这样，H^+（氢离子）和 OH^-（氢氧根离子）结合而形成水。



$$H^+ + OH^- \rightarrow H_2O$$

图 15-2 是一套去离子的示范装置。

经过一段时间，树脂将达到饱和，这可以通过去离子水电导率的提高而检测出来。树脂的再生过程包括向阳离子交换树脂中施加强酸和向阴离子交换树脂中施加强碱，这将引起逆向的反应而使树脂恢复到最初的状态。在再生过程中，金属和离子浓缩析出，然后对重金属进行沉淀处理以便净化。图 15-3 说明了去离子剂的再生过程。

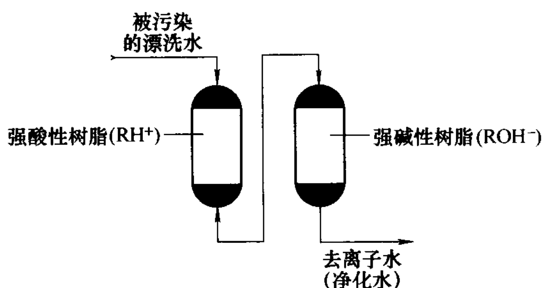


图 15-2　去离子示范装置

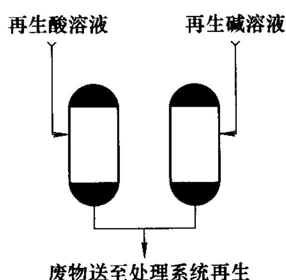


图 15-3　离子交换系统：再生系统

离子交换是一种较昂贵的方法，因此通常作为那些有限量的废物的最后净化手段，对使用化学沉淀方法不能达到限定标准的污染物进行净化处理。

Spitz（1990）阐述了使用离子交换技术回收金属的工艺，如图 15-4 所示。从清洗工段流过来的金属浓度较低的废水先通过活性炭过滤单元过滤，这一步滤除了有机杂质，例如专用的漂洗槽添加剂。接下来，过滤后的水通过离子交换柱收集器得到再生。再生的过程包括用从离子交换树脂中置换金属的试剂来漂洗这些交换柱，结果使金属溶液能够被浓缩到 1～30g/L，可以直接回收到处理槽中。另外，金属也可以单独用电解的方法从溶液中得到，回收为金属薄片。

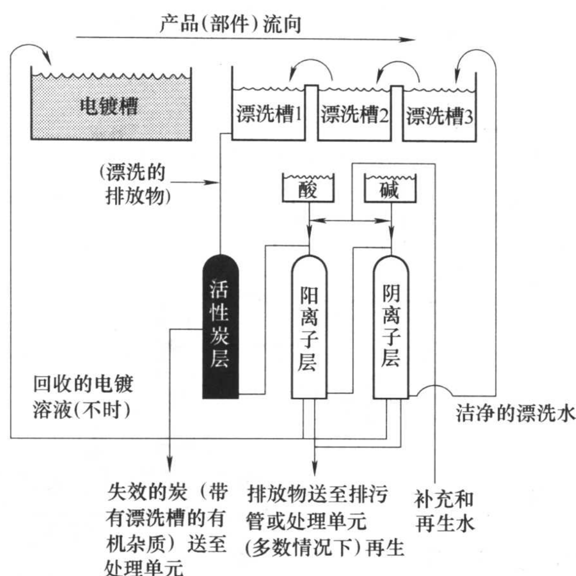


图 15-4　离子交换系统（经 Spitz 同意，1990）

注：这种方法基于金属和交换离子浓度的差异

15.4.4　反向渗透

薄膜分离技术采用有渗透性或半渗透性的薄膜从溶剂中分离出化学废水中的金属和其他有毒的物质，反向渗透是这种工艺中很有期望的技术之一。

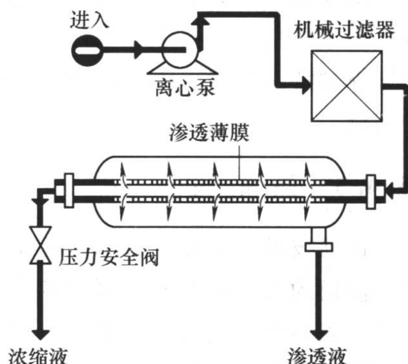


图 15-5　反向渗透通过压力降低溶液浓度，金属离子越过离子置换薄膜（经 Leonida 同意，1989）

在这个过程中，溶解在水中的盐在高压作用下被移除。图 15-5 是一个反向渗透系统的一般图解：漂洗水（进入）在约 28 ~ 35kg/cm^2（400 ~ 500psi）㊀的高压作用下流过半透膜。对这种薄膜，水是可以渗透过去的，而离子却不能，这样，水就通过了渗透膜，而不能通过的物质就被浓缩了。最初溶液中所含的全部物质在渗透出的水中的浓度（见图 15-6）都变得很低，可以被简单地排放到污水管或者作为去离子水而用于清洗。渗透后的浓缩液含有更高浓度的电镀液，可

㊀ 本书此处原文似有误，且因 1kgf/cm^2 = 98.0665kPa ≈ 14.22332lbf/in^2，故“28 ~ 35kg/cm^2（400 ~ 500psi）”应为“28 ~ 35kgf/cm^2（398.25 ~ 497.82lbf/in^2）”。—译者注

以被送回电镀槽，在某种程度上弥补取出板子时所造成的电镀溶液的损耗。

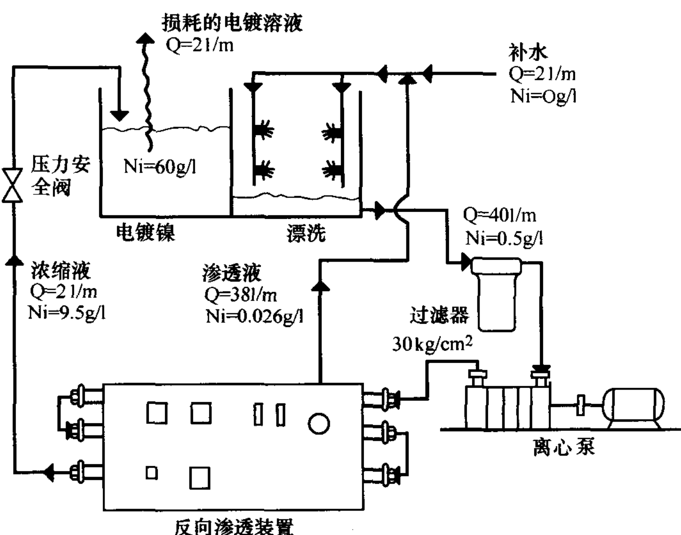


图 15-6 反向渗透：镍盐和水从镍电镀槽中被回收利用的应用实例（经 Leonida 同意重绘，1981）

反渗透技术具有一些优点，把它直接应用到产生污染物的电镀槽中更为经济。其主要的缺点在于设备的价格和渗透膜的使用费用较高。这项技术对镀铬和镀镍槽特别有用。Broomfield（1992）调查了水洗站有关选择水处理设备的种种问题。

15.4.5 蒸馏回收

这项技术是用加热来浓缩污染物的。水分子蒸发成为蒸气，然后再冷凝为可再使用的无污染的水，剩下的浓缩液可以被处理成回收盐或金属。这项技术主要用来回收经电镀槽后漂洗用水中用于清除污迹的铬酸，这样漂洗水就可以被再循环使用了。杂质（三价铬）通过采用阳离子置换而从电镀槽中被清除。

15.4.6 重金属的沉淀

为了减小使用过的化学制剂的危害，必须减少有毒原料的使用量，使产生的高浓度的不溶于水的淤渣最少。基本的过程包括重金属的沉淀，图 15-7 所示为其批量处理的简图。

在这个过程中，溶液的 pH 值会因铜、镍、铅、铁或铬等重金属变为不溶于

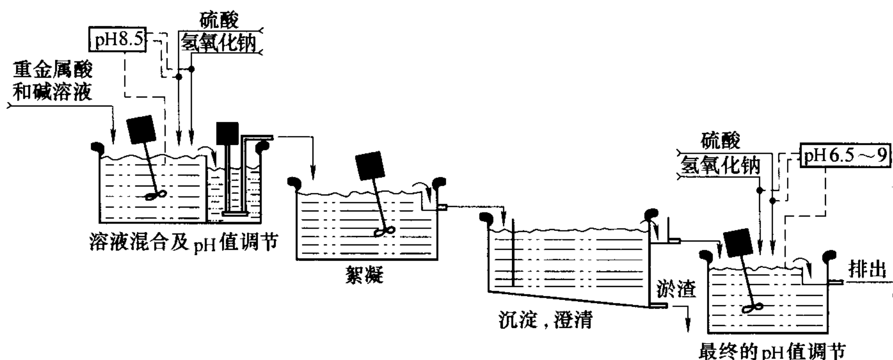


图 15-7　重金属沉淀原理（经 Bosshart 同意采用，1983）

水的氢氧化物沉淀而上升到一定程度。来自于盐溶槽的淤渣经过过滤可以被进一步浓缩。在 pH 值达到临界值时，立即形成氢氧化物或发生中和反应。可是，氢氧化物的絮凝和沉淀可能需要几个小时的时间。可以看到对不同的金属来说，当沉淀出现后，pH 值的范围并不一样。

由此产生的淤渣可以被处理，所以可以分离出一些可以被再次使用的化学制剂。这种方法能回收重金属和其他原料，因而很受欢迎。

另外，如果金属回收的经济利益不高，那么高浓度的淤渣也可以在特别选定的不会污染地下水的填埋场里掩埋。然而，填埋场的选址必须认真和地方机构仔细协商，注意不应在靠近饮用水源的地方倾倒这些淤渣，这种方法被认为是最差的处理方案。还有一种方法是把这些淤渣焚烧。

15.4.7　电解回收

图 15-8 为电解过程，通常被称为电解冶炼法，它使用的是电极定位技术。反应单元是整个系统的中心，由许多并排由导线相连的阳极和阴极组成。要处理的溶液被泵入反应单元后，在直流电流的作用下，溶液中的金属离子被还原或在阴极表面析出。金属全部析出后，溶液再流回它最初的反应槽中。阴极的每一面上沉积的金属，厚度可达 0.125 ~ 0.25in（3.175 ~ 6.35mm）。金属沉积所形成的薄片，用人工方式从反应单元中取出的阴极上剥离下来，这些阴极又可在下一个循环中发挥作用（Spitz，1990）。

Gemmell（2003）指出，在印制电路板制造业中预防污染的关键是使损失的化学制剂减到最小，用于漂洗的水量要减到最小，并且要回收、再利用，使得金属铜再生。

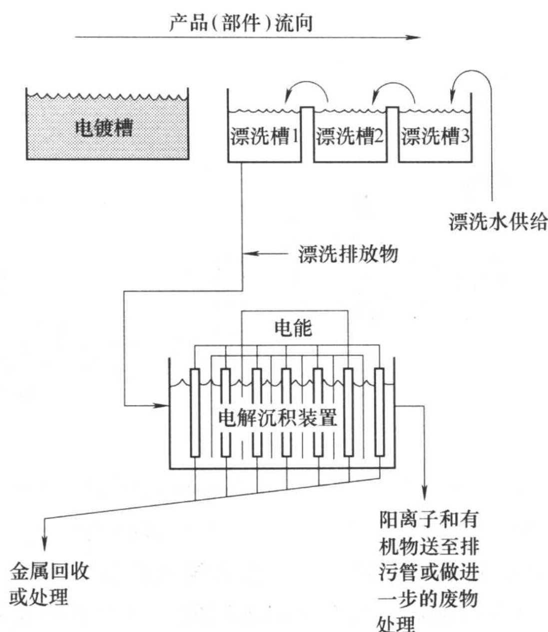


图 15-8 使用电解方法通过电能减少金属离子使其恢复到基本态（经 Spitz 同意重绘，1990）

15.5 空气污染

印制电路板工业的空气污染有几个来源，主要的污染有两类：粉尘和烟雾。

15.5.1 粉尘

钻孔、切割、磨砂、靠模铣切、斜切、开槽和碾磨等机械操作中残留的细小环氧玻璃微粒所形成的微细的粉尘是一种主要的空气污染源，这些粉尘对工人和机器都是有害的。这种类型的污染可以采用集尘器消除，比如：

1）负压吸尘器：它们基于真空吸尘器的原理，粉尘被收集在一个可以定期清理的袋子中。

2）工业除尘器：这些设备基于旋涡分离原理。气流被输送到一个双向涡流中，开始旋转，粉尘微粒被离心力分离。通过这个过程，它们沉降到设备的底部，并从那里被清除，而气流从设备顶部离开这些涡流。

15.5.2 烟雾

在印制电路板加工过程中有几个阶段会产生大量污染周围空气的烟雾。例

如，蚀刻和电镀过程就会产生大量的化学烟雾，尽管不是真正有毒，但也可能危害到持续接触它们的人员。因此，在墙上安装几个排气扇也许并不能真正解决问题。有几种类型的排烟装置可以用于单个的机器或中央系统。

来自酸洗阶段的酸雾和蒸气法去油污的有机蒸气通常不含其他污染物质，因此它们时常独立于其他物质，以便于随后的处理。排气设施通常不会在把它们排放到大气中之前混合处理这些烟雾。这种情形大多不能满足空气污染控制机构的要求，在被排放到大气中之前，这些空气必须被净化。特别是在那些大量产生这种烟雾的地方，必须做到这一点。这些会致污的有毒烟雾的净化方法如下所述。

湿洗：这些烟雾含有酸性氨或氯化物致污物，在被排放到大气中之前，使它们靠近水或水溶液，以使致污物被吸收。各种技术（包括使烟雾气流通过高速喷射的液体或雾中）被用来增加接触的表面积，以便更有效地吸收致污物。

各种技术都已被用到湿洗工艺中了。污染的空气以压入或抽入的方式通过那些包含小型聚四氟乙烯（特氟隆）槽或环的湿洗柱，以提高接触表面积。

对于酸性气体的处理，建议使用氢氧化钠溶液或水，而氨气总是用水来处理。

为了处理含氯溶剂，如含氯的碳氢化合物（如三氯乙烯、三氯乙烷和亚甲基氯化物），人们采用了活性炭吸附装置。这种技术也能回收含氯的碳氢化合物，以供重新利用。

15.5.3　组装车间的洁净环境

组装环境的洁净度是生产优质产品的基本要求，然而洁净度的等级取决于产品的要求，也就是期望达到的质量和可靠性标准。例如，通常的空气净化标准对绝大多数的消费品来说就已经足够，然而应用在航空电子和医药领域的设备就需要最高等级的洁净度。

净化车间的标准已经制定，根据规定在温度和湿度条件下，$1ft^3$（或 1L）空气中含有 $1/2\mu m$ 或较大尺寸的微粒的数量分成三类，它们是：100000（3500）级、10000（350）级和 1000（3.5）级。

按照美国材料试验学会的规定，净化车间的标准分级及其微粒大小分布如图 15-9 所示。一个净化车间内的微粒数是通过使用光学散射镜来测量的。已知体积的空气中的微粒可以被统计出来，不同大小的微粒分布柱状图也可以借助使空气通过不同尺寸的过滤器而得到。

空气中污染微粒的主要来源是人员的操作，微粒因运动或从衣服上脱落而产生。通常可行的做法是提供一些由无毛绒材料制成的防护服包裹操作人员的头、脸和脚。

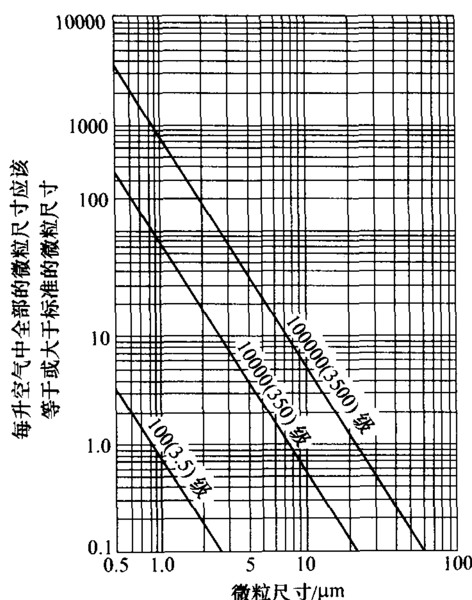


图 15-9　三种净化车间标准等级的污染物微粒的尺寸分布

(经 Haskard 同意重绘，1998)

多数的印制电路板制造商在洁净的车间环境内进行生产，以达到满意的生产率，特别是对精细导线电路的生产。不过，尽管大量的资金被投入到净化车间上，许多公司还是发现有一定数量的问题是由污染物引起的。Hamilton (1996) 指出，普遍采用的污染评估方法并不能完全解决这个问题，他建议污染稽核机构应对大范围的污染源进行评估。

15.6　印制电路板的回收

近年来，报废的电子产品数量的不断增长受到了越来越多的关注。这个问题在发达国家已经很尖锐了，不久的将来，发展中国家很可能也会如此。例如，欧洲委员会（2001）估算电子垃圾占城市废物的 4%，而且它还以每年 3% ~ 5% 的速度增长，是其他废物增长率的 3 倍。超过 90% 的这种废物被填埋处理。每年制造的蜂窝电话有 4 亿部，到 2007 年，可能有 5 亿台个人计算机（PC）将变为废物。

在欧洲，机动车报废规定中所确定的条款是产品回收和再循环的先例，这个任务由进口商或制造商来完成。该规定也对制造的有害材料的范围进行了限制，据说，一份正在被修订的目录将包括电子装备（Rae，2003）。废弃电子设备和电动产品（WEEE）及缩减有害材料（RoHS）等规定在 2001 年 5 月 15 日

被采用。它制定了回收目标，并且规定了对铅、汞、镉、六价铬以及一些溴化阻燃剂的使用限制。

一些国家级的法规也已经制定。瑞典的回收法在 2001 年颁布。日本的电子设备回收法在 2001 年 4 月颁布，其中涵盖了大量的家用电器，而且预计会被逐渐扩展到计算机和其他领域。这项规定中，每名用户要付费 30 美元，主要的电子厂商已经建立了回收公司。有关环境保护的意识在印度也快速发展起来，类似法规的建立指日可待。

人们希望在世界范围的工业国家开始实施电子产品回收的最终法规，强烈期望电子产品的处理过程得到特别的关注（Legarth 等人，1995）。电子产品通常被定义为具有一定数量印制电路板的复杂产品。如今，一方面，印制电路板构成了处置上的一个环境难题；另一方面，印制电路板还包含了元素周期表中的绝大多数元素，因此可以被看作是一些稀有和贵重材料的来源。

15.6.1　目前的印制电路板废料的处理方法

印制电路板废料有各种来源，如印制电路板制造商、OEM（原始设备制造厂）、个人、团体和设备拆解单位。这些废料可以被直接送去重新利用、回收或填埋。目前，一般地大约有 85% 的印制电路板废料被填埋，而只有 15% 被进行了一定程度的回收（Goosey 和 Kellner，2002）。

根据印制电路板废料内贵重金属的含量，可以分为三个级别。它们是：

1）低级废料：它包括含有铁氧体变压器、大型铝制散热片和层叠纸板的电源组件和电视机印制电路板。

2）中级废料：它们含有一定量的贵重金属，通常来自于高可靠性设备中的引脚和边缘连接器。

3）高级废料：它包括具有高含量贵重金属的板子，如含黄金的集成电路、分立元器件、光电子设备，带黄金和钯引脚的电路板等。

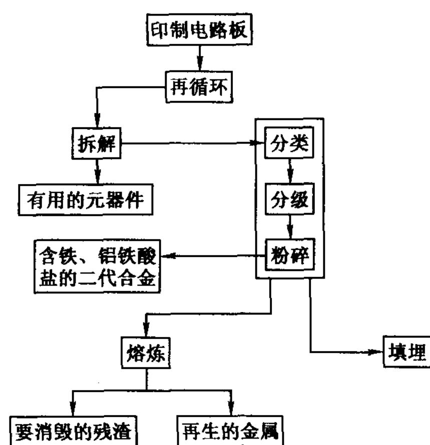


图 15-10　印制电路板废料处理方法（经 Goosy 和 Kellner 同意重绘，2002）

这些材料的分级有助于确定使用回收操作的经济性。但是，如果通过人工选择拆解含铁和铝比例较高的组件，则有可能对低到中等级范围内的材料重新分级。

回收包括印制电路板废料的拆解，以及随后的分类、分级和粉碎等操作。

铁和铝等金属通过使用磁性和涡流分离而从最终的基本产品中分离出来。再循环的产物被送去填埋或者送去冶炼场，然而只有那些含有足够的黄金或其他贵重金属的板子才被送去熔炼，其他所有的非贵重金属类的废料板都被送去填埋。大约有1%的废料板被单独进行专门的再生处理，目的是为了回收贵重金属。图15-10说明了印制电路板废料处理的一般方法。

15.6.2 印制电路板废料的性能

印制电路板废料，特别是那些组装剩下的碎板子，形状各异而且构成复杂。这些板子含有不同等级的无机物，及相对含量较低的与铜、焊料、各种合金及有色金属和含铁金属结合在一起的贵重金属（Feldman 和 Scheller，1994）。这些印制电路板废料上的材料和组件的固有物理和化学性质具有很大的不同。采用的回收技术主要依据其不同的化学性质，详述如下。

15.6.2.1 密度差异

包含在印制电路板废料中材料密度的典型值如表15-1所示：

表15-1 包含在印制电路板废料中材料密度的典型值

材　料	密度范围/（g/cm^3）
黄金、铂类、钨	19.3~21.4
铅、银、钼	10.2~22.3
镁、铝、钛	1.7~4.5
铜、镍、铁、锌	7.0~9.0
非金属材料	1.8~2.0

很明显，不同的材料可以使用基于密度的分离系统进行分离，在工业处理中通常使用这种方法（Barsky 等人，1991）。

15.6.2.2 磁导率和电导率差异

低强度的磁分选器在选矿业得到了很好的应用和发展，它可以被用来从印制电路板废料中分离出含铁材料。另一方面，有色金属可以通过静电和涡流分选器分离，这在回收工业中被广泛应用（Iji 和 Yokoyama，1997）。

15.6.3 印制电路板的拆解

在多数回收印制电路板的操作中，拆解是必需的步骤。组件的拆解便于对一般金属和贵重金属进行挑选，也利于回收。另外，这些有价值材料的集中可以减少重新处理的费用。拆解的另一个优点是隔离了有危害的组件，以免它们污染其他的碎料。出于经济和生态的考虑，有些电子元器件在拆解后可以被重新使用。然而，拆解、测试和销售这些可重新使用的电子元器件的费用必须与使用新品的费用比较，以便选择（Keimeier，1994）。

废料的拆解多数是由人工使用简单的手动工具完成的，由于成本的原因，

有时会限制所有这些操作的完成。拆解被认为是回收低价元器件的非常重要的一部分，对将来全面的回收策略有重大的影响。为了确保拆解过程中的安全及价格因素的考虑，机械拆解及自动化和机器人拆解技术已经被开展应用（Feldmann 和 Scheller，1994）。自动元器件拆解操作主要包括扫描板子以读出所有元器件的标识信息，从储存元器件数据库中读取元器件数据，确定其数值，并判定元器件是焊接的还是安装的：如果是安装的，拆解将由自动机械完成；如果是焊接的，那么拆焊将通过使用激光或红外能量完成。

Yokoyama 和 Iji（1995）描述了一种回收带有电子元器件的印制电路板的方法，如图 15-11 所示。一种实用的粉碎印制电路板废料及把产生的粉末分离为富含铜的粉末和玻璃纤维树脂粉末的方法已经成熟。采用这种方法，对于平均粒度为 100～300μm 的印制电路板粉末，被回收的铜可达到94%。被回收的玻璃纤维树脂粉末用作环氧树脂类涂料和胶粘结剂时，可以改良其机械强度和热膨胀性能。从印制电路板上拆解元器件，再采用印制电路板废料再生方法去处理剩余的板子，这种回收带有电子元器件的印制电路板的方法正在研究中，这也是下一步要做的事情。

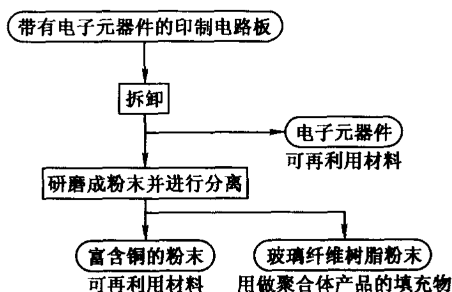


图 15-11 带有电子元器件的印制电路板的回收方法（经 Yokoyama 和 Iji 同意，1995）

15.6.4 印制电路板的再生技术

目前，两种再生过程中材料分离的技术已经呈现出了一定的发展潜力，它们是机械方法和湿法冶金方法。

15.6.4.1 机械方法

商业上采用的机械方法可处理印制电路板的电子碎料的范围很宽，包括板上组装的和非板上组装的印制电路板。Yokoyama 和 Iji（1995）描述了一种实用的粉碎印制电路板废料并将其分为富含铜的粉末及含有玻璃纤维和树脂的粉末的方法。这种方法包括粉碎和分选，如图 15-12 所示。

在这种方法中，印制电路板废料被粉碎的过程包括使用切割和剪切进行的碾压粉碎阶段和使用压缩和剪切进行的精细粉碎阶段。这种粉碎过程效率高，并且也显示出了很高的抗磨损力。那些富含铜的粉末和玻璃纤维树脂的粉末，通过使用空气涡流的重力分选阶段及静电分选阶段被回收。被粉碎的废料粉末的有效平均微粒直径的范围为 100～300μm。在这种尺寸的印制电路板废料中铜的回收率可达94%。当印制电路板废料中铜的含量为7%时，从重力分选阶段得

到的富含铜的粉末中铜的含量可以超过 20%。图 15-13 表示了每种成分微粒的尺寸分布。

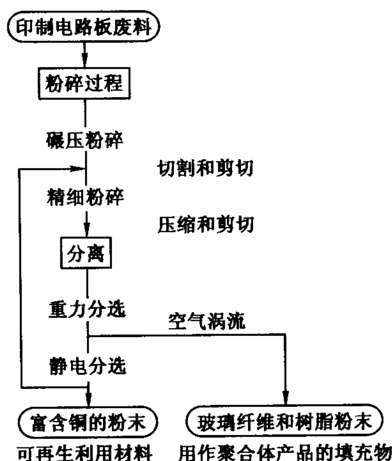


图 15-12 印制电路板废料的粉碎和分选过程（经 Yokoyama 和 Iji 同意采用，1995）

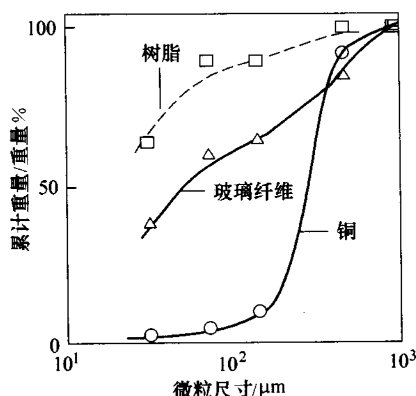


图 15-13 印制电路板废料粉末中各种成分的尺寸分布（经 Yokoyama 和 Iji 同意重绘，1995）

15.6.4.2 湿法冶金方法

许多湿法冶金方法的发展预示着从印制电路板废料中回收所有材料的可能。其中有一种方法是从插脚和边缘连接器中回收黄金，这些引脚和边缘连接器是由人工从使用气刀等工具切割的废料上拆下来的。在美国，一种基于溶剂分解的方法已得到发展，它不但能更有效地回收金属，而且还能高质量地回收像环氧物质这样的塑料原料，并且能额外收获卤化物和溴化烃衍生物。(www.recyclers-info.de/de/bigat/prasengl.htm)。

另外，有各种研究用于评估利用稀释的无机酸以及随后的基于浓缩和分选的金属回收技术联合使用的可行性，例如溶剂萃取、离子置换、吸附和胶结作用等（Satio，1994）。

15.7 环境标准

现在，世界范围内的印制电路板工业以相同的原则对待质量控制和废物管理，人们坚信会有更多的针对环境管理需要的综合处理方法。就像公司和国家对待从食品包装到通过光纤传输视频与音频的每一件事情都已制订标准一样。由国际标准化组织（ISO）修订的针对环境管理和保护制度的国际标准已经出

台，称为 ISO 14000。这个标准针对的是环境的焦点问题，而不是适用面有限的静态标准，但是更要通过广泛的途径推动其不断完善（Bruhn，1997）。

ISO 14000 要求公司分析他们对环境有重大影响的操作并将其排序，量化和制订可行的环境目标，确定员工和有关上层管理部门的构成和责任，研制内部审核和行为纠正方案，并建立有效的培训和联络系统。这个标准可以被看作是针对商业管理的整体质量控制的扩展，目的就是不断努力以获得成功，关键是要持之以恒。这个标准的最大好处可能是它鼓励公司对环境问题要有前瞻心理，作改善环境的先锋。它激励工艺的研发，以消除公司在材料、加工和废物等方面受到条例限制。

在处理环境问题中，有一种方法是从末端进行解决，例如废物的处理以及树立“为环境而设计”的新观念，中心目的是降低能源和减少产品制造中的消耗品，设计产品使之能够被分解、重新使用和/或循环利用，对环境的影响减到最小。这种趋势可能会逐渐影响产品的设计和制造、工艺的研发、工厂地点和销售策略（Shaw 等人，1997）。国际石油公司（IPC）参与美国环保局（EPA）的环境保护设计，就是一个供应商、制造商和消费者充分参与、加快新型的有益环境的技术开发的例子。

15.8　人员的安全保护措施

在印制电路板加工厂里，要使用不同种类的高浓度化学制剂。如果这些化学制剂没有被适当处理，就会给员工健康带来许多伤害和危险。因此，对于处理这些化学试剂的人员要强制接受有关使用和防护措施的培训。以下是应该遵守的防护措施：

1）所有的保护装置，如护目镜、防护面具、防毒面具、手套等必须及时提供给操作者，以便使用。

2）在印制电路板工业中使用的高浓度化学制剂必须小心处置，正确地贮存在密闭的瓶子和容器里，并且放在通风良好的房间中。严禁在存放这些化学制剂的地方吸烟和吃东西。

3）应该优先考虑人员的安全。建议穿戴不透水和耐酸的防护服、手套、有过滤器的防护面具及护目镜。

4）注意所有的事项，以防止事故发生。坚持遵守和履行常规的和建议的安全规程。万一事故伤及人员，则要立即打电话叫医生。

15.9 印制电路板制造中的有毒化学物质

有几种化学制剂被用于印制电路板制造过程中，其中有许多制剂都具有某种危险性，需要小心处理。下面是一份用在印制电路板工业中有毒化学制剂清单。

1. 能够引起剧烈燃烧和腐蚀的化学制剂

1） HNO_3，硝酸（浓度为20% ~70%）；

2） HNO_3，硝酸（浓度 >70%），有易燃烧的危险；

3） H_3PO_4，磷酸（浓度 >25%）；

4） H_2SO_4，硫酸（浓度 >20%）；

5） KOH，氢氧化钾（无水的和浓度 >10% 的溶液）；

6） NaOH，氢氧化钠（苛性钠）；

7） HCOOH，甲酸（浓度 >25%）；

8） $HClO_4$，高氯酸（浓度为 10% ~50%）；

9） HCl，盐酸（浓度 >25%）；

10） CH_3COOH，醋酸（浓度 >25%）；

11） CrO_3，三氧化铬，易然。

这些化学制剂应该被贮存在密闭的瓶子中。不要在其蒸气中呼吸，要避免接触皮肤、眼睛或衣服。

2. 如果吞服，会产生严重中毒危险的化学制剂

1） $Me^{I}CN$、$Me^{II}(CN)_2$，氰化物；

2） $Me^{I}F$、$Me^{II}F_2$，氟化物（可溶的）；

3） HF、氢氟酸，可引起剧烈燃烧；

4） HCHO，甲醛，可引起燃烧和腐蚀。

这些化学制剂也应该贮存在密闭的瓶子中，而且要避免接触到皮肤和眼睛。

3. 侵蚀呼吸道，有中毒危险的化学制剂

1） NH_3，氨（气），可侵蚀皮肤、眼睛；

2） NH_4OH，氨水（10% ~35% 的 NH_3 溶液），可侵蚀皮肤、眼睛；

3） NH_4OH，氨水（ >35% 的 NH_3 溶液），可导致燃烧和腐蚀；

4） NO_2、N_2O_4，氧化氮，可侵蚀皮肤和眼睛；

5） Cl_2，氯气，可侵蚀皮肤、眼睛。

这些化学制剂也侵蚀皮肤和眼睛，可引起燃烧和腐蚀。它们应该被贮存在密闭的瓶子中，并放置于凉爽和通风的地方。不要吸入其气体/蒸气。对于喷溅到皮肤或眼睛上的化学制剂要用大量的清水清洗。

4. 易燃的化学制剂

1） C_6H_6，苯，剧毒；

2） CH_3OH，甲醇，有毒；

3） C_2H_5OH，乙醇。

在所有使用这些制剂的工作场所应禁止吸烟。贮存的瓶子应该保持紧闭，放置于凉爽和通风良好的地方，且远离明火、热源和火花。

5. 蒸气对健康有影响的化学制剂

1） CCl_2: CCl_2，四氯乙烯；

2） $CHCl$: CCl_2，三氯乙烯。

不要吸入其蒸气，确保它们贮存在紧闭的瓶子中，且贮存区有充足的流通空气。

15.10 无铅焊接

在电子制造业中，一个被严重关切的问题就是铅的消除。而铅是传统的易熔的锡-铅（Sn-Pb）合金焊料的主要组成成分，其中含锡 63%、铅 37%。因为合金中铅的存在，使它既有良好的导电性和热传导性，又具有 183℃的低熔点。

由于暴露的铅可引起健康和环境问题，使铅在电子装配操作中的使用受到了详细的审查（Melton 和 Fuerhaupter，1997）。如果铅进入到人体，会影响神经系统、肾脏和生殖系统。通常，在工业上处理铅焊料或焊件的车间里，是禁止吃东西、喝水、吸烟或使用化妆品的。可是，由于铅很软，在处理已经涂了一层锡-铅或焊料（无论是否带着焊料保护层）的板子时，或者在波峰焊机上操作或者手工焊接时，很容易蹭到手指上。所以，在某种程度上手被沾污也许是不可避免的。熔融的铅不会蒸发到空气中，但是氧化铅，就是被称做浮渣的东西，是一种松散的粉末，能随风飘扬。因此，不论是在喷锡阶段还是在焊接阶段的撇渣操作，或是把浮渣抖到另一个容器中的操作都要小心翼翼进行。

总的来说，由于暴露程度非常低，在印制电路板加工和装配车间控制铅的吸收也不是那么困难。只要适当加以注意，在使用含铅焊料的车间生产过程中和不使用铅的工作场所中都可以保持同样的安全和健康。不管用何种方法，另外一项重要的措施就是禁止用铅制造电子产品，即限制大幅度增长的电子垃圾！这种垃圾会污染地下水。

在印度和美国，饮用水中最大的允许铅含量都是 0.015mg/l。人类身体内铅的驻留时间非常短，其平均水平如下：

1） 铅在血液中的驻留时间：大约为 25 天；

2） 铅在软组织中的驻留时间：大约为 40 天；

3）铅在不稳定的骨骼中的驻留时间：>25 年。

对于成年人大于 1mg/L，对于儿童大于 0.7mg/L 的铅浓度，就会引起严重的铅中毒。剧烈的毒性会引起疝气（强烈的腹部痉挛）、失去知觉、昏迷甚至死亡。Manko（1994）列举了在进行铅基焊接时应该遵守的安全和预防措施。

任何含有锡-铅焊料的印制电路板碎料都不会通过针对铅的毒性溶出试验（TCLP）测试。在德国和美国这些国家中，含铅的电子垃圾在被称为黑名单的目录上列出，而且被禁止作为一般垃圾处理。锡-铅焊接的板子超过了有害废物规定的性能值。这些性能包括可燃性、腐蚀性或毒性。这意味着如果不恰当地进行处理，那么电子垃圾需要被作为一种潜在的危险物质来对待。

除了环境条例和回收条例，另一个限制存在于市场方面。在日本，大多数优秀的电子公司都已经宣布了他们的铅替换时间表，而且使用环境符号来标注他们的无铅产品。在世界范围内，真正转向无铅制造的压力似乎来自于消费者。一些研究表明，"绿色"公司具有被接受的市场优势。假设产品的价格和性能相同，消费者倾向于选择有"环境安全"标志的产品。

欧盟差不多已经完成了其立法，有望从 2006 年 7 月 1 日起实施，可能要禁止电子类产品中的以下材料：

1）铅（有例外）；

2）汞；

3）镉；

4）六价铬；

5）卤化阻燃剂。

日本、丹麦和欧盟（EU）禁止产品中含铅的规定将给全球市场带来影响。这将迫使许多美国制造商有效地消除铅，就像其立法机构将要禁止的一样。

欧盟的制造商（Nimmo，2003）指出，其早在 2003 年就计划制造无铅产品了，到 2004 年，所有的新产品都应是无铅的。仅仅有一项豁免将被许可，那就是"铅的使用是技术或科学上不可避免的，或者替代铅的方法对环境和（或）健康带来的负面影响很可能超过这种方法本身所带来的环境效益"。

15.10.1 锡-铅焊料的替代

锡-铅焊料的替代品应该具有下列合乎要求的性质：

1. 一般性质

1）毒性更小；

2）更好的环境属性；

3）熔点大约为 185℃；

4）电导率和锡-铅焊料一样或更好；

5）热导率和锡-铅焊料一样或更好。

2. 焊接性质

1）可与所有基础金属进行分子间的结合；

2）较低的表面张力；

3）和基板（或组件）的亲和性；

4）和焊剂配方相兼容。

3. 物理性质

可以在以下几方面改良力学性能：

1）抗剪强度；

2）蠕变强度；

3）热稳定性。

前面提到的作为锡-铅合金的替代品，在电子工业中波峰焊接使用的是锡-铜合金，回流焊接使用的是锡-铜-银合金。其他像锡-银或锡-锑合金被用在自动化和工业应用中。含锑和铋的合金非常适合于消费类产品，对于这些产品而言，略高于 100℃的较低的熔化温度并不是什么不利条件。锡-铋合金具有 139℃的低熔点，对热敏系统非常适用。锡-锌合金具有非常吸引人的温度范围及价格，但可能容易在操作前后被氧化和腐蚀。更多的像锡-铜-金或者含有铟或锗的合金（Slezak，1994）正在被测试和考虑使用。然而，如果在不久的将来，不同合金的数量缩减到最少，将是很有利的。

表 15-2 给出了一些合金和它们熔点的清单，这些合金可能被用作锡-铅焊料的替代品。

表 15-2 铅可能的替代品（Courtesy Braun，2003）

合金	组成成分	液相线/℃	性 能	回流焊接	波峰焊接
Sn-Pb	Sn-37Pb Sn-36Pb-2Ag	183 179	标准和指标	* * *	* * *
Sn-Cu	Sn-0. 7Cu	227	适度的高成本		* * *
Sn-Ag	Sn-3. 5Ag Sn-3. 5Ag-0. 7Cu	221 217	高成本和 高温度	* * *	* * *
Sn-Ag-Bi	Sn-2. 8Ag-1Bi Sn-2. 0Ag-3Bi Sn-3. 5Ag-3Bi Sn-3. 5Ag-6Bi	220 215 210 206	+Cu，铟（In）	* * * * * * * * *	* * *
Sn-Zn	Sn-9Zn Sn-8Zn-3Bi	199 190	Zn 氧化问题	* * * * * *	
Sn-Bi	Sn-58Bi	138	低熔点	* * *	

15.11 几个常用标准

1）IPC-WP/TR-584：关于印制电路板和装配所使用的无卤素材料的 IPC 白皮书和技术报告。这个文件是 IPC 白皮书和技术报告的组合，既概述了 IPC 的地位，同时也总结了关于电子工业中无卤素材料课题的重要资料。

2）IPC-Environment：《环境论最好的实践指导》。这本书由英国印制电路板联合会出版。它详细描述了产业界、环境保护的成就，并且做了使铜的废水排放减到最少的建议，提出了必须逐步采取环境管理系统。它也详细介绍了防止污染和使废物的产生减到最小的步骤。

3）IPC-1331：自发的电热加工设备安全标准。这个自发的标准规定了电热加工设备的设计、安装、操作和维修的最低要求，以使触电危险减到最小，防止燃料仓、舱室衬垫和烘干设备发生火灾。

附　　录

附录 A　术语中英文对照表

A

安装孔	Mounting Hole
凹点	Pit
凹蚀阴影	Etch-back
凹蚀阴影	Shadowing
奥米伽表	Omegameter

B

B 阶段	B-stage
B 阶段材料	B-stage Material
B 阶段树脂	B-stage Resin
白斑	Measling
白点	Measling
板边测试	Test Coupon
板边接点	Edge-board Contacts
板边金手指	Finger
板边空地	Edge Spacing
板边连接器	Edge Connector
板边试样	Coupon
板边试样	Test Coupon
板边数据	Border Data
板边余隙	Edge Clearance
板材厚度	Laminate Thickness
板角标记	Corner Mark
板面图形	Pattern

板扭	Twist
板翘	Twist
半固化片	Prepreg
半加成制程	Semi-additive Process
保护层	Cover Layer
保温时间	Soak
保险商实验所	UL
保险业试验所	UL
“保险业试验所” 标志	Underwriters’ Symbol
边界扫描	Boundary Scan
边距	Edge Spacing
边距	Margin
编译程序	Compiler
扁平排线	Flat Cable
变形	Strain
标绘	Plotting
标准格	Grid
表层	Coating
表护层	Cover Lay
表面（电流）泄漏	Surface Leakage
表面间连接	Inter-facial Connection
表面绝缘电阻	Surface Insulation Resistance (SIR)
表面黏装	Surface Mounting
表面黏装技术	SMT
表面黏装器件	SMD
表面缺陷	Cosmetic Defects
表面润湿剂	Surfactant
表面贴装	Surface Mounting
表面贴装技术	SMT
表面贴装器件	SMD
表面粘着	Surface Mounting
表面张力	Surface Tension
丙烯酸树脂	Acrylic Resin
并存性	Compatibility
波峰焊	Wave Soldering

玻璃态转变温度	Glass Transition Temperature
玻璃态转化温度	Glass Transition Temperature
玻璃纤维环氧树脂	Glass Epoxy
玻璃纤维胶片	FR-4
玻璃纤维显露	Fibre Exposure
玻璃纤维织材基板	GI
剥离强度	Peel Strength
泊	Poise
不润湿	Non-wetting
不完全水清洗	Semi-aqueous Cleaning
不沾锡	Non-wetting
布设总图	Master Drawing

C

CAD/CAM 系统	CAD/CAM system
CAD 系统	CAD system
C 阶材料基板	C-stage Material Laminate
裁切线	Trim Lines
参考边缘	Reference Edge
残留	Residue
残渣	Residue
侧出	Outgrowth
侧蚀	Undercut
测试板	Test Board
测试点	Test Point
测试定位装置	Test Fixture
测试夹具	Test Fixture
测试图形	Test Pattern
层	Layer
层间距离	Layer-to-layer Spacing
层间连接	Inter-layer Connection
层压板	Laminate
层压压机	Laminating Presses
超声波焊接	Ultrasonic Soldering
超声连接	Ultrasonic Soldering

成批焊接	Mass Soldering
重合度	Registration
重熔	Re-flowing
重熔焊接	Re-flow Soldering
重做	Re-work
尺寸稳定性	Dimensional Stability
出气	Outgassing
初检良品率	First Pass Yield
传输电缆	Transmission Cable
传输线	Line
传输线	Transmission Line
串扰	Cross-talk
串信	Cross-talk
吹孔、气孔	Blow Hole
吹气	Outgassing
醇酸树脂	Alkyd
瓷制无脚芯片载体	LCCC
次要缺陷	Minor Defect
催化剂	Catalyst

D

带出	Drag-out
带和盘	Tape-and-reel
带状线	Stripline
单面板	One-side Board
单面板	Single-sided Board
单影像生产底片	Single-image Production Master
导电箔	Conductive Foil
导电图形	Conductive Pattern
导电粘结剂	Conductive Adhesive
导孔	Via
导体间距	Conductor Spacing
导通孔	Feed-through
导通孔	Via Hole
导线	Conductor

导线	Line
导线	Traces
导线层	Conductor Layer
导线的基本宽度	Conductor Base Width
导线分布图	Conductor Pattern
导线厚度	Conductor Thickness
导线间距	Conductor Spacing
导线宽度	Conductor Width
导线面	Conductor Side
导线设计宽度	Design Width of Conductor
导引孔	Tolling Hole
倒角	Chamfer
灯芯效应	Wicking
底板	Substrate
底材	Substrate
底层涂料	Primer
底片	Artwork
底漆	Primer
电镀	Plating Up
电镀棒	Plating Bar
电镀杆	Plating Bar
电镀阻剂	Plating Resists
电路板密度	Board Density
电路检测器	Circuit Testers
电屏蔽	Electronic Shielding
电气规则检查	ERC
电容耦合	Capacitive Coupling
电性间距下限	Minimum Electrical Spacing
电压层	Voltage Plane
电子电路互连与封装协会	IPC
电子束粘接点	Electron-beam Bonding Electroplating
电子组件	Device
垫	Pad
钉头	Nail Heading
定位槽	Index Edge Marker/Index Edge

定位槽	Locating Notch (Locating Slot)
定位孔	Indexing Notch (Indexing Slot)
定位孔	Locating Edge (Locating Hole)
镀	Clad
镀层	Plating
镀层突出	Overhang
镀通孔	Plated Through-hole
镀通孔	PTH
镀通孔尺寸上限	Maximum, Plated Through-hole Size
端接	Termination
端接区	Terminal Area
端子	Termination
短路	Short
断路	Cut
断路	Open
对不准	Mis-registration
对准标记	Register Mark
对准度	Registration
多层印制电路板	Multi-layer PCB

F

反向驱动	Backdriving
返工	Re-work
防焊膜	Solder Resist
防焊膜	Solder Resist
放热	Exotherm
放射性引脚	Radial Lead
非导电环氧树脂	Non-conductive Epoxy
非导电图形	Non-conductive Pattern
非导通孔	NPTH
非电解电镀	Electroless Deposition
非镀通孔	Unsupported Hole
非功能焊垫	NFP
非功能焊垫	Non-functional Land
非极性化合物	Non-polar Compound

非支撑孔	Unsupported Hole
分层	De-lamination
分极	Polarization
分立元器件	Discrete Component
分散剂	Dispersent
粉红圈	Pink Ring
浮渣	Dross
腐蚀性助焊剂	Corrosive Fluxes
负过程	Subtractive Process
负片	Negative (Noun)
负片影像	Reverse Image
负图像	Reverse Image
负像	Negative (Noun)
负型阻剂	Negative-acting Resist
负性抗蚀剂	Negative-acting Resist
负载试验	Load Test
附边测试板	Test Coupon
附加镀铜	Extraneous Copper
附连测试板	Coupon
附着层	Adhesion Layer
复像生产底片	Multiple-image Production Master
复像印制电路模板	Multiple-image Production Master
覆	Clad
覆箔	Clad or Cladding
覆盖层	Cover Coat
覆盖式通孔	Tented Via
覆金属箔基材	Metal Clad Base Material
覆墨刀	Flood Bar
覆铜板	Copper Clad

G

Gerber 档案	Gerber File
改良剂	Modifier
干膜	Photopolymer
干膜阻焊剂	DFSM

干膜阻剂	Dry Film Resists
干燥时间	Drying Time
高密度互连	H. D. I
高温加速老化试验	Burn-in
高压电测	Hipot Test
蛤壳式夹具	Clamshell Fixture
蛤壳式针盘	Clamshell Fixture
隔离（性）	Isolation
隔离孔	Clearance Hole
隔焰甑	Muffle
弓曲	Bow
功能测试	Functional Test
攻角	Angle of Attack
共沸混合液	Azeotrope
鼓起	Bulge
固化	Cure
固态线	Solidus
固相线	Solidus
故障列表	Fault List
刮刀式印制	Screen Printing
拐角标记	Corner Mark
贯穿连接	Through Connection
光敏聚合物	Photopolymer
光学绘图机	Photoplotter

H

焊（接）点针孔	Solder Connection Pinhole
焊接点	Bridged Joint
焊垫	Land
焊膏	Solder Paste
焊剂	Rosin Flux
焊剂填充焊锡丝	Flux-cored Solder
焊脚	Fillet
焊接	Soldering
焊接残余	Flux Residue

焊接面	Solder Side
焊接升离	Bond Lift-off
焊料堵塞	Solder Plug
焊料润湿	Wetting
焊盘	Land
焊盘	Terminal Area
焊枪头	Soldering Iron Tip
焊锡（软焊锡）	Solder (Soft)
焊锡面	Solder Side
焊锡污迹	Solder Marks
焊锡性能测试	Solderability Testing
横出	Outgrowth
护形膜	Conformal Coating
化学镀	Electroless Deposition
化学镀铜	Electroless Copper
化学孔壁清洗	Chemical Hole Clearing
化学转化膜	Chemical Conversion Coating
环开断裂	Circumferential Separation
环氧胶渣	Epoxy Smear
环氧树脂	Epoxy Resins
环氧树脂玻璃纤维板材	ERBGF
环状断孔	Circumferential Separation
回流峰值	Re-flow Spike
回流焊接	Re-flow Soldering
回蚀	Etch-back
回蚀死角	Shadowing
汇编语言	Assembly Language
汇电杆	Bus Bar
汇流排	Bus Bar
混安装技术	Mixed Component-Mounting Technology
混合零件组装技术	Mixed Component-Mounting Technology
活化	Activating
活化	Initiating
活性树脂钎焊剂	Flux, Activated Rosin Flux

J

J形接脚	J-Leads
J形引线	J-Leads
击穿电压	Breakdown Voltage
机械白边	Haloing Mechanically
机械白圈	Haloing Mechanically
基板	Base Laminate
基材	Base Material
基材厚度	Base Material Thickness
基覆铜	Base Copper
基准	Datum
基准边	Reference Edge
基准点	Fiducial
激光	Laser
极化	Polarization
集成电路	IC
挤入式接触	Press-fit Contact
挤压接头	Crimp Contact
寄生信号	Spurious Signal
加成法	Additive Process
加工指示器	Process Indicator
夹杂物	Entrapment
架空高度	Snap-off Distance
兼容性	Compatibility
检测标绘	Check Plots
检查抽样	Inspection Lot
键槽	Keying Slot or Polarizing Slot
键槽	Keyway
交叉链接	Cross-linking
交叉耦合	Cross-linking
交键	Cross-linking
交连	Cross-linking
胶糊渣	Resin Smear
胶渣	Resin Smear

胶渣	Smear
脚垫	Footprint
阶段式焊接	Step Soldering
接触电阻	Contact Resistance
接触间距	Contact Spacing
接触区域	Contact Area
接地层	Ground Plane
接地层隔离	Ground Plane Clearance
接线端	Termination
节点	Node
结合点	Heel, Bonding
介电常数	Dielectric Constant
介质	Dielectric
介质常数	Dielectric Constant
介质强度	Dielectric Strength
金属箔	Foil
金属电极无引脚端面元器件	MELF
金属化	Metallization
紧密引脚距	Fine pitch
浸镀	Immersion Plating
浸焊法	DIP Soldering
浸润	Wetting
晶须	Whisker
晶圆	Die
径向引线	Radial Lead
静电放电	ESD
静电放电敏感性	ESD Sensitivity
局部层间导通孔	Interstitial Via Hole
聚对二甲苯	Parylene
聚四氟乙烯	Teflon
聚酰亚胺	Polyimide
聚酰亚胺薄膜	Kapton
聚酰亚胺树脂	Polyimide Resins
聚酰亚胺软材	Kapton
聚酯（迈拉）	Polyester (Mylar)

卷带式连载元器件	Taped Components
绝缘阻抗	Insulation Resistance
绝缘阻抗	Insulation Resistance
绝缘阻抗	Surface Insulation Resistance (SIR)
绝缘阻抗测试	Surface Insulation Resistance (SIR) Test

K

卡板	CARD
开窗口	Cross-hatching
开口清单	Aperture List
抗拉强度	Pull Strength
抗蚀剂	Resist
焊接性	Base Solderability
焊接性	Solderability
可靠度	Reliability
可靠性	Reliability
可湿性	Basic Wettability
可重复性	Repeatability
空洞	Void
孔壁	Barrel
孔壁抗拉强度	Hole Pull Strength
孔壁空洞	Hole Void
孔壁强度	Hole Pull Strength
孔环	Annular Ring
孔环浮起	Lifted Land
孔环下限	MAR (Minimum Annular Ring)
孔拉脱强度	Hole Pull Strength
孔密度	Hole Density
孔图	Hole Pattern
孔位	Hole Location
孔位破出	Hole Breakout
口径列表	Aperture List

L

蓝牙	Bluetooth

老化	Aging
烙铁头	Soldering Iron Tip
冷焊接	Cold Solder Connection
连接盘	Land
连接盘	Terminal Area
连接盘起翘	Lifted Land
连接盘图形	Footprint
连接盘图形	Land Pattern
连接器	Connection
连接器舌片	Connector Tongue
连通性测试	Continuity Testing
良品率	Yield
裂缝	Cracking
流变学	Rheology
流焊	Flow Soldering
硫化	Cure
露布纹	Wave Exposure
露出孔	Access Holes
露纤维	Fibre Exposure
卤化聚酯	Halogenated Polyester
卤化物	Halides
绿漆	Solder Mask
绿漆	Solder Resist
逻辑图	Logic Diagram
裸板	Bare Board
裸板测试	BBT
裸铜覆阻焊工艺	SMOBC

M

麻点	Pit
埋孔	Buried Via
曼哈顿距离	Manhattan Distance
盲孔	Blind Via
盲孔	Via
盲孔与埋孔	B & B

毛细作用	Capillary Action
铆眼	Eyelet
美国国家标准学会	ANSI
美国线规	AWG
美国信息交换标准码	ASCII
密耳	Mil
免清洗焊接	Non-clean Solder
敏化	Sensitizing
模块	Module
模拟	Simulation
模拟电路	Analog Circuit
模拟电路仿真器	Analog Circuit Simulator
模拟功能测试	Analog Functional Test
模拟组装板电路测试	Analog In-circuit Test
模压印制线	Stamped Printed Wiring
模制垫圈	MCR
母板	Mother Board

N

内层	Internal Layer
耐电弧性	Arc Resistance
黏度	Viscosity
粘接层	Bonding Layer
粘接接口	Bond Interface
粘接强度	Bond Strength
粘接强度	Pull Strength
粘接时间	Bonding Time
粘结剂	Adhesive
黏滞度	Viscosity
扭曲	Twist

O

鸥翼接脚	Gull Wing Lead

P

PTFE 树脂	Teflon
排除故障	De-bugging
盘	Pad
旁路电容	Bypass Capacitor
喷锡	Solder Leveling
喷锡板	SMOBC
披覆	Clad or Cladding
片模框架	Biscuit Frame
偏置定位槽	Keying Slot or Polarizing Slot
平均故障间隔时间	Mean Time between Failure (MTBF)
破洞	Hole Void

Q

起泡	Blistering
气层	Gas Blanket
气隙	Air Gap
气相（焊接）	Vapour Phase
器件	Device
嵌入元器件	Embedded Component
强迫吹风对流	Forced-air Convection
强迫通风对流	Forced-air Convection
桥接	Bridging
球脚格点阵列（封装）	BGA
球栅阵列封装	BGA
全板镀铜	Panel Plating
全加成法	Fully-additive Process

R

热除锡	Heat and Pull
热电偶	Thermocouple
热风整平	HASL
热固性	Thermoset
热膨胀系数	Coefficient of Expansion, Thermal-CTE

热区	Hot Zone
热塑性	Thermoplastic
热沾焊锡	Tinning
熔化范围	Melting Range
熔析	Liquation
熔锡层	Fused Coating
柔性印制线路	Flexible Printed Wiring

S

三嗪树脂	Triazine
散热器	Heat Sink
闪光扫描图像控制软件	FICS
烧熔边缘	Pitting
设计规则检查	DRC
生产底片	Production Master
失锌现象	Dezincification
十字交叉区	Cross-hatching
拾取-贴装设备	Pick-and-place Machine
蚀刻	Etching
蚀刻函数	Etch Factor
蚀刻剂	Etchant
蚀刻因子	Etch Factor
蚀刻印制电路板	Etched Printed Board
蚀刻阻剂	Etch Resist
适时供应	Just-in-time (JIT)
受扰焊接	Disturbed Solder Connection
树脂	Resin
数据库	Database
数字电路	Digital Circuit
数字化	Digitizing
数字逻辑仿真器	Digital Logic Simulator
双波峰焊	Dual Solder Wave
双波焊接	Dual Solder Wave
双列直插封装	Dual In-line Package (DIP)
双面板	Double-sided Board

双面组装	Double-sided Assembly
水清洗	Aqueous Cleaning
顺序增层法	SBU
丝网印制	Screen Printing
丝网印制	Silkscreen
丝印	Silkscreen
松节油	Terpenes
松香	Rosin
算法	Algorithm
缩锡	De-wetting

T

塌散	Slump
坍落	Slump
探测系统	Probing Systems
碳氟化合物	Fluorocarbon
弹回高度	Snap-off
弹片式接触	Bellows Contact
套检底片	Inspection Overlay
套眼	Eyelet
特氟龙	Teflon
性能阻抗	Characteristic Impedance
性能阻抗	Impedance, Characteristic
填锡	Solder Fillet
调节剂	Modifier
调试	De-bugging
条线	Stripline
跳线	Jumper
贴护层	Conformal Coating
贴平式导体	Flush Conductor
萜烯	Terpenes
通过/不通过测试	Go/No-Go Test
通孔连接	Through Connection
通孔弯线连接法	Clinched-wire through Connection
通孔引脚组装	PIH Assembly

铜箔	Copper Foil
铜箔基板	Copper Clad
铜镜测试	Copper-mirror Test
统计过程控制	Statistical Process Control (SPC)
突出	Bulge
图形电镀	Pattern Plating
拖焊	Drag Soldering
脱锌	Dezincification

W

外表树脂层	Blutter Coat
外部环境	Ambient
弯曲故障	Flexure Failure
弯月面	Meniscus
万用表	Multimeter
网版印制	Screen Printing
网版印制	Silkscreen
网表	Netlist
网布材料	Screen
网格	Grid
微裂纹	Crazing
微切片法	Micro-sectioning
微条线	Micro-strip
伪元器件	Dummy Component
温度曲线	Temperature Profile
文件编制	Documentation
无电电镀	Electroless Deposition
无电镀	Electroless Deposition
无焊盘导通孔	Landless Hole
无焊绕接	Solderless Wrap
无环通孔	Landless Hole
无连接盘导通孔	Landless Hole
物理层	Physical Layer

X

吸湿性	Hygroscopic
锡膏	Solder Paste
锡尖	Solder Projection
锡钎焊突点	Solder Projection
锡桥	Solder Bridging
锡塞	Solder Plug
锡柱	Solder Plug
细线设计	Fine line design
下限电性间距	Minimum Electrical Spacing
线孔间距	Conductor-to-hole Spacing
线路	Trace
线路电镀	Pattern Plating
线路与零件布局图	Roadmap
相对湿度	Relative Humidity
相容性	Compatibility
小孔	Pitting
芯片	Dice
芯片检测器	Chip Testers
芯片粘接板化学沉积	Chemically-deposited Printed Chip on board
芯吸	Wicking
信号	Signal
信号层	Signal Plane
信号导线	Signal Conductor
修改	Re-working
修理	Repair
虚焊接	Cold Solder Connection
虚拟样机	Virtual Prototype
悬出	Outgrowth
循环速率	Cycle Rate

Y

压扁式引脚	Swaged Lead
压合	Lamination

压合空洞	Laminate Void
压痕	Indentation
压接接触件	Crimp Contact
压膜	Lamination
严重缺陷	Major Defect
掩蔽法	Tenting
药膜面	Emulsion Side
液化温度	Liquids
遗漏率	Escape Rate
异物	Inclusion
逸气	Outgassing
溢流	Bleeding
翼形引脚	Gull Wing Lead
阴影	Shadowing
引导孔	Pilot Hole
引脚	Lead
引脚	Pin
引脚密度	Pin Density
引入检测法	Guided Probe Method
引线安装孔	Lead Mounting Hole
引线突出	Lead Projection
印制电路	Printed Circuit
印制电路板	PCB
印制电路板	Printed Board
印制电路板	Printed Circuit Board
印制电路板厚度	Board Thickness
印制电路板装配	Printed Board Assembly
印制电路板装配	Printed Circuit Assembly
印制电路板组装文件	Assembly Drawing
印制电路模板	Production Master
印制电路组装图	Printed Wiring Assembly Drawing
印制电子器件	PEC
印制接点	Printed Contact
印制线路	Printed Wiring
印制线路板	Printed Wiring Board

印制线路板	PWB
印制线路布设图	Printed Wiring Layout
印制元器件	Printed Component
硬度	Durometer
硬度计	Durometer
硬焊合金	Brazing Alloy
硬化	Cure
永久性阻剂	Permanent Mask
有机保焊剂	OSP
有机活性剂	Organic Activated (OA)
余隙	Clearance
预浸材料	Prepreg
预热	Pre-heat
元件	Component
元器件孔	Component Hole
元器件立起	Tombstoning
元器件密度	Component Density
元器件自动插入	Automated Component Insertion
原理图	Schematic Diagram
原始底片	Artwork Master
原始底片	Master Artwork
原始底片	Photomaster
原始光洁面	Plate Finish
原始图形	Master Pattern
圆顶封装体	Glob Top
圆盘绘图格式	DPF
圆线缆带	Ribbon Cable
钥槽	Key
允收检验	Acceptance Test
允收品质水准	Accepted Quality Level (AQL)
允收品质水准	AQL

Z

Z型冲程	Z-Stroke
杂质	Contaminate (Contaminant)

载流量	Current-carrying Capacity
载芯片板	COB
再加工	Re-working
再流焊	Re-flow Soldering
皂化剂	Saponifier
沾锡	Wetting
针床电测	Bed-of-Nails
针孔	Pinholes
针盘	Fixture
真空拾取	Vacuum Pick-up
整板电镀	Panel Plating
正片	Positive
正型光阻剂	Positive-acting Resist
正性抗蚀剂	Positive-acting Resist
支撑板	Backpanel (Backplane)
支撑孔	Supported Hole
支路	Branched Conductor
枝晶体	Dendrite
织纹显露	Weave Exposure
直角板边连接器	Right-angle Edge Connector
直通引脚	Straight-through Lead
制程板	Panel
中和剂	Neutralizer
轴心引脚	Axial Lead
逐次增层法	SBU
逐次重复焊接	Step Soldering
逐次重复曝光	Step-and-repeat
主体	Body
助焊剂	Flux
助焊剂	Flux, Activated Rosin Flux
助焊液（敷层）	Solder Oil (Blanket)
注解	Annotation
铸塑粘结剂	Cast Adhesive
装配密度	Packaging Density
装配图	Assembly Drawing

准尺寸孔	Dimensional Hole
准确度	Accuracy
着力爪	Anchoring Spur
字符	Legend
自动测试设备	ATE
自动测试设备	Automatic Test Equipment
自动光学检验	AOI
总浮空	Overhang
总线	Bus
纵横比	Aspect Ratio
阻焊剂	Solder Resist
阻剂	Mask
阻剂	Resist
阻膜	Resist
组件	Component
组件面	Component side
组装板电测试	In-circuit Test
组装工具	Assembly House
组装印制板	Populated PCB
组装印制电路板	Printed Circuit Assembly
钻孔布设图	Master Dot Pattern
钻孔器	Drills
最小电气间距	Minimum Electrical Spacing

附录B 术语英中文对照表

Acceptance Test：允收检验

决定是否接收印制电路板的一种测试，以检验其是否达到了买卖双方达成的相关准则。

Accepted Quality Level（AQL）：合格质量水平、允收品质水准（AQL）

指被验批的产品在抽检时，每100个抽样产品中的最大不良产品个数，低于该数目时认为该批产品是可接受的。

Access Holes：露出孔、余隙孔

穿过电路板各层的孔洞，这些孔洞具有共同的中心轴，多基板表层的露出孔使外界能够“接近”保护层下面的板面焊接点，以便于零件的焊接。

Accuracy：准确度、精确度

测量值或观察值与标准值之间的偏离程度[⊖]。

Acrylic Resin：丙烯酸树脂

一种热固的、透明的树脂。

Activating：激活、活化

为提高非导电材料表面粘接力使其达到要求而进行的一种化学处理过程。

Additive Process：加成法

指在非导体的基板表面或金属复层上，有选择地沉积金属以生成导体线路的方法。

Adhesion Layer：附着层

将金属防护板粘接到集成电路表面金属垫上的金属层。

Adhesive：粘结剂

像胶水、接合剂等可将物体紧固到一起的物质。在表面贴装工艺中，环氧粘结剂用来将SMD固定在衬底上。

Aging：老化

随时间推移而发生的性质的改变，例如焊接性。

Air Gap：气隙

像导线、焊垫、接地层等载流导体之间的绝缘的空气间隙。

Algorithm：算法

⊖ 在印制电路板工艺中常指所钻成的孔位，有多少把握能达到其“真位”的能力。——译者注

解决某一问题的程序，通常指数学方面的。

Alkyd：醇酸树脂

一种用来固定元器件的具有良好导电性能的热固树脂。

Ambient：外部环境

与印制电路板相关的周围环境。

Analog Circuit Simulator：模拟电路仿真器

用虚拟的测试信号通过所设计电路的虚拟模型来验证所设计模拟电路的一种工具。

Analog Circuit：模拟电路

主要由分立元器件组成的电路，如电阻、电容、二极管、电感等。该电路的输出是输入信号的函数，为频率、幅度等参数变化的连续电信号。幅度常用电压、电流、电阻等物理量表示。

Analog Functional Test：模拟功能测试

在电路板级，通过开关转换器将各种模拟测试信号应用于印制电路板来显示输出电流。

Analog In-circuit Test：模拟组装板电路中测试

在加电前对印制电路板上的每一个零件及印制电路板本身的电路，所一并进行的总体性电性能测试。

Anchoring Spur：着力爪

软板上，为使孔环焊垫在板面上有更强力的附着性质，可在其孔环外多余的空地上，再另行加附几只指爪，使孔环更为巩固，以减少自板面浮离的可能。

Angle of Attack：攻角

指在网版印制时，行进中的橡皮辊与网版平面所形成的夹角。

Annotation：注解

与电路板设计相关的文字或图例，文字包括字母和符号，位于板区的外部，图例常出现在板区的内部。

Annular Ring：孔环

穿过印制电路板上圆点的、小洞周围的、具有一定宽度的导电铜环[⊖]。

ANSI：美国国家标准学会

“American National Standards Institute”的缩写，由工业界和美国政府组织成立，用于制定商业和通信标准。

AOI：自动光学检验

⊖ 在内基板上此孔环常以十字桥与外面大地相连，且更常作为线路的端点或过站。在外基板上除了作为线路的过站之外，也可当成零件脚插焊用的焊垫。——译者注

自动光学检验“Automatic Optical Inspection”的缩写。

Aperture List：口径列表，开口清单

包含焊垫及导线等的形状和尺寸的清单，以便在光电绘图仪的底片上进行感光。

AQL：允收品质水准

“Accepted Quality Level”的缩写，指被验批的产品在抽检时，认为能满足合同要求的“不良率上限”[1]。

Aqueous Cleaning：水清洗

以水为主的清洗技术，还包括中和剂、皂化剂、表面活性剂、分散剂和抗起泡物质。

Arc Resistance：耐电弧性

指在高电压低电流下所产生的电弧，当此电弧在绝缘物料表面经过时，物料本身对电弧抗拒力或忍耐力谓之“耐电弧性”。其耐力品质的好坏，视其被攻击而造成碳化物导电之前，所能够抵抗的时间长短而定。

Artwork Master：原始底片

印制电路板导电图的一个精确尺寸图片，它用来制作1:1的印制线路模板，这一比例的选择取决于所需要的精度。

Artwork：底片

用来制作原始模型的一个精确比例的结构图，通常用较大比例的各种宽度的带子和一些特殊形状的物体来代表导体。

ASCII：美国信息交换标准码

“American Standard Code for Information Interchange”的缩写。是一个7bit的码字，分别指配给字母表中的各个字母、10个十进制数字、标点符号以及其他一些符号。

Aspect Ratio：纵横比

板厚与最小孔径的比值[2]。

Assembly Drawing：装配图

说明印制电路板上各元器件位置及其参考标志的图纸。

Assembly Drawing：印制电路板组装文件

说明印制电路板上各种组件以及描述将这些组件结合在一起以实现特定功能的资料的一种文件。

---

[1] AQL并非为保护某特别批的产品而设，而是针对连续批的产品品质所定的保证。——译者注

[2] 以国内的制作水准而言，此纵横比在4:1以上者，即属高纵比的深孔，其钻孔及镀通孔的制作过程都比较困难。——译者注

Assembly House：组装工具

一种将元器件粘接、焊接到印制电路板上的制造工具。

Assembly Language：汇编语言

一种用于译成机器语言的表述简单的计算机语言。

ATE：自动测试设备

“Automatic Test Equipment”的缩写，见自动测试设备（Automatic Test Equipment）。

Automated Component Insertion：元器件自动插入

通过电子控制的设备将离散元器件组装到印制电路板上。

Automatic Test Equipment：自动测试设备

为了评估性能等级，设计用于自动分析功能或静态参数的设备，也用于故障隔离分析。

AWG：美国线规

“American Wire Gauge”的缩写，规定各种金属丝直径的规范。高位表示数量，低位表示直径。

Axial Lead：轴心引脚

指零件的引脚是沿零件轴线的两端引出，如电阻、电容和其他轴向元器件等，与自零件底部引出的放射状引脚不同。

Azeotrope：共沸混合液

由两种或多种溶剂，按一定比例组成混合液，其沸点比各个混入的溶剂还低，可利用不同的溶解力去洗净焊接后板面的残余物。

B-stage Material：B 阶段材料

通常指胶片制造过程中，作为补强材料的玻璃布或棉纸，在通过胶水槽进行含浸工程后，恢复到一个中间阶段，即热固型树脂的半聚合半硬化状态，称为 B 阶段树脂。

B&B：盲孔与埋孔

“Blind and Buried via hole”的缩写。

Backdriving：反向驱动

数字电路的一种电路内测试程序。

Backpanel（Backplane）：支撑板

见“母板（Mother Board）”。

Bare Board：裸板

未经装配的印制电路板，板子上有导线、连接端和完整的层，但没安装元器件。

Barrel：孔壁

在钻孔中电镀形成的金属柱面。

Base Copper：基覆铜

一种初期的，一面或两面均附有铜箔的覆铜层压板。在印制电路板制造过程中，部分基覆铜将被蚀刻掉，最简单的印制电路板上面的导体仅由基覆铜组成。

Base Laminate：基板

一种衬底材料，在其上面可形成导线图形。

Base Material Thickness：基材厚度

基材的厚度，不包括其表面上沉积的物质和铜箔。

Base Material：基材

绝缘材料（刚性板或柔性板）以及粘接在其一面或两面上的铜箔的总称。它是铜箔基板的同义词，是印制电路板制造的基本原材料，组装后对其上的元器件提供支持。

Base Solderability：焊接性

在最低限度的实际条件下金属或金属合金表面能被熔融的焊锡沾湿的容易程度。

Basic Wettability：可湿性

金属或金属合金能被熔融的焊锡沾湿的容易程度。

BBT：裸板测试

"Bare Board Test" 的缩写。

Bed-of-Nails：针床电测

印制电路板的一种测试方法，采用包含一套弹性探针的针盘配合板子上的一些与探针相接触的关键节点来完成测试。

Bellows Contact：弹片式接触

接插件的连接器触片为弯折的扁平弹片，可以在整个接触范围内提供均匀的弹力。

BGA：球脚格点阵列（封装）、球栅阵列封装

"Ball Grid Array" 的缩写，一种无引脚阵列封装技术，其焊锡球脚安装在封装体的底部。

Biscuit Frame：片模框架

较大母板上的一种电路阵列。

Bleeding：溢流

液态阻焊剂向外扩散超出额定标准的一种情况。

Blind Via：盲孔

在多基板中，部份导通孔因只需某几层的互连，故刻意不完全钻透，只到

达某一面最外层下面的一层。

Blistering：起泡

基材的层间或基材与导电箔之间，基材与保护性涂层间产生局部膨胀而引起局部分离的现象，它是分层的一种形式。有时也指阻焊剂层、导体层与基材的分离。

Blow Hole：吹孔、气孔

在填锡过程中由于镀通孔孔壁发生吹气现象而导致的破洞，见出气、吹气、逸气（Outgassing）。

Bluetooth：蓝牙

蓝牙是一个短距离（10m 左右）2.4GHz 的无线连接标准，它还可应用于无线个人网络（PAN）。这些无线个人网络的设备间可以用来以高达 721kbit/s 的速率来交换数据，比如用于蜂窝电话、数码相机、打印机以及家用电器之间。

Blutter Coat：外表树脂层

基材板紧固结构上面的外部树脂层。

Board Density：电路板密度

对电路板上贴装元器件的部分与板子总可用面积二者比率的度量。电路板密度低于 50% ~60% 的可做成单基板，高于 70% ~80% 的需做成多基板。

Board Thickness：印制电路板厚度

基材和覆盖在基材上的导电材料（包括镀层）的总厚度。

Body：主体

电子元器件除引脚以外的部分。

Bond Interface：粘接接口

从引脚到引脚终止的接线片处的区域。

Bond Lift-off：焊接升离

焊接引脚从焊盘表面分开的故障。

Bond Strength：粘接强度

指积基板材中，将相邻层分开所需的垂直于板材表面的力的大小，每单位面积中所施加的力即粘接强度。

Bonding Layer：粘接层

多层印制电路板基材中将各个离散的层粘接在一起的胶片层。

Bonding Time：粘接时间

进行热把焊接时，从开始加热（接触引脚和焊垫）到焊接点形成的时间。

Border Data：板边数据

标注于电路板边缘区域的图样，例如工具标的物、测试图形、对准度标志等。

Boundary Scan：边界扫描

元器件在硅晶片级设计进行的自测，该测试允许通过内置的有 4 或 5 个引线的测试总线访问输入输出引线。

Bow：弓曲

印制电路板对于平面的一种形变．它可用圆柱面或球面的曲率来粗略表示，如果是矩形板，则弓曲时它的四个角都位于同一平面，（见板扭（Twist））。

Branched Conductor：支路

印制电路板组装中电气连接两个或更多引脚的导体，有些支路明显地接地，承载和复位信号，连接很多引脚。

Brazing Alloy：硬焊合金

一种金属合金（焊锡），其熔化温度高于 450℃，低于该温度的金属被焊接在一起。

Breakdown Voltage：击穿电压

在该电压下绝缘材料或介质被破坏，另指引起气体或蒸气达到离子化而导电的电压。

Bridged Joint：焊接点

将两个或者更多导体连接起来使之在电气上短路的焊锡。

Bridging：桥接

过多的焊锡堵塞在导线之间的空隙中而导致它们短路的一种情况，锡桥通常发生在波峰焊过程中，桥接基本上是板子上焊垫与其临近的印制线或焊垫的短路。

B-stage Resin：B 阶段树脂

树脂硬化的一个中间状态，硬化通常在整个层合周期内完成。

B-stage：B 阶段

树脂部分的固化（多数已经与玻璃布紧固），在某一特殊的温度范围内它将软化，通常用来将各基板结合在一起而形成多基板。

Bulge：鼓起、突出

由于内部分层或纤维与树脂分离而造成印制电路板或覆箔板表面隆起的现象。

Buried Via：埋孔

多基板中不到达任何一个表面层的导通孔，埋孔只穿过板子的内部几层。

Burn-in：高温加速老化试验

一种测试设备的方法，通过长时间加电、高温等以便于发现并消除设备倾向于发生的一些故障。

Bus Bar：汇电杆、汇流排

用于分配电能的导线管或沟道，类似于印制电路板上的导体。

Bus：总线

印制电路板上用于将电压、地等分配到较小的分支印制线的较厚的印制线或导电金属条。

Bypass Capacitor：旁路电容

在电路元器件周围提供相对较低的交流阻抗的电容。

CAD system：CAD 系统

计算机辅助设计系统。计算机辅助设计允许通过计算机、程序、设计过程中的步骤进行交互，计算机完成数据处理功能，而最后由操作者来做出决定。

CAD/CAM system：CAD/CAM 系统

计算机辅助设计/计算机辅助生产系统。计算机辅助设计是采用特殊的软件工具来计算印制电路布线图形的，计算机辅助生产将以上的设计变成真正的产品。

Capacitive Coupling：电容耦合

板上相邻两导体间由于它们之间的电容而引起的相互的电气作用。

Capillary Action：毛细作用

由于凝聚力和粘接力使液体（如熔化的焊锡）逆着重力，在相隔很近的固体表面流动的一种自然现象。

CARD：卡板

见“印制电路板（Printed Board)”。

Cast Adhesive：铸塑粘结剂

用来粘接聚酰亚胺多基板和柔性刚性板（与 B 阶段的预浸料坯类似）的一种特殊的粘接材料。

Catalyst：催化剂

可以加速或改变树脂的老化，但并不变成最终产品的一部分的一种化学物质，例如：硬化剂、促进剂、抑制剂等。

Chamfer：倒角

为消除本来很尖锐的边角而将其形状变得圆滑[1]。

Characteristic Impedance：性能阻抗

某扩散波中电压与电流的比率，即在导线上每一个点对该波所产生的阻抗。性能阻抗用欧姆来表示。

Check Plots：检测标绘

[1] 在电路板的板边金手指区，为了使其连续接点的插接方便起见，不但要在板边前缘完成切斜边的工作，还要将板角或方向槽口的各直角也一并去掉，称为“倒角”。——译者注

仅适用于检测的一种钢笔标绘，用圆形表示焊垫，用矩形轮廓表示厚印制线来代替布线图中的填充图形，该技术用于加强多层之间的透明度。

Chemical Conversion Coating：化学转化膜

由金属和化学溶液发生化学反应而生成的一层保护膜。

Chemical Hole Clearing：化学孔壁清洗

清洗钻孔内暴露导体表面的化学过程，另见回蚀（Etch-back）。

Chemically-deposited Printed Chip on board：芯片粘接板化学沉积

该技术将集成电路在印制电路板上直接粘接并打线，而不必首先进行集成电路的封装。

Chip Testers：芯片检测器

用来检测个别集成电路的基于大型计算机的系统，特别应用于检测大规模集成电路和超大规模集成电路。

Circuit Testers：电路检测器

大量印制电路板检测器的统称，例如针床电测试、连接盘图形检测、引导探测、板内印制线检测、负载测试、裸板测试以及部件检测等。

Circumferential Separation：环状断孔、环开断裂

电路板的镀通孔铜壁的整圈性孔壁的断开称为环状断孔[⊖]。

Clad or Cladding：披覆、覆箔

是以薄层金属披覆在核心基材的外表，作为电路板基板[⊜]。

Clad：覆、镀

将相对较薄的一层或一片金属箔粘接到基材的一面或两面，例如覆金属箔基材。

Clamshell Fixture：蛤壳式夹具、蛤壳式针盘

一种可以探测印制电路板两个面的电路内测试针盘。

Clearance Hole：隔离孔

多层印制电路板某层导电图形上，与基材镀通孔同轴但孔径更大的一种孔。

Clearance：余隙

板子上金属与金属之间的空隙。

Clinched-wire through Connection：通孔弯线连接法

印制电路板上用金属线穿过通孔形成连接，随后在两外侧打弯，将板子两面的导体图形连接起来并焊接。

⊖ 电路板的镀通孔铜壁，有提供插焊及层间互相连通的功能，其孔壁完整的重要性自不待言，环状断孔是一项品质上的严重缺点。——译者注

⊜ 如有的基板即采用在基材板上披覆铜箔。——译者注

Coating：表层

涂敷于元器件或基材表面的一层较薄的物质，可能是导体也可能是绝缘体。

COB：载芯片板

“Chip On Board”的缩写，一种将裸电路直接粘接到基片表面的元器件封装技术，然后通过精微的导线将之与基片互连。

Coefficient of Expansion，Thermal-CTE：热膨胀系数

温度变化1℃时各种物料尺寸发生的微小变化，用ppm/℃来表示。

Cold Solder Connection：冷焊接、虚焊接

显示出较差润湿性的焊接，其特征是焊接点看起来略带灰暗且多孔[㊀]。

Compatibility：兼容性、相容性、并存性

物料可以混和在一起或接触而继续保持分离不发生反应的情况。

Compiler：编译程序

一种软件模块，用来分析一个程序将其由高级语言转换成二进制机器码。

Component Density：元器件密度

印制电路板单位面积上元器件的数量。

Component Hole：元器件孔

印制电路板上元器件引脚穿过该孔以便焊接，或将其与印制电路进行机械连接及与导体图形进行电气连接，同义词为安装孔。该孔用来完成元器件终端与印制电路板的附着和电气连接，包括引脚和导线。

Component side：组件面

也叫正面（Primary side），指电路板的表层，绝大多数的元器件安装在其上。元器件面也指板子最上面的一面（由上往下数第一层）。

Component：元件、器件、组件、元器件

任何用来制造电气设备的基本部件，例如电阻器、电容器、双列直插封装器件或连接器等。

Conductive Adhesive：导电粘结剂

一种物质，通常向其中加入金属粒子（通常是银），以增强其导电性。

Conductive Foil：导电箔

为形成导体图形而在基材一面或两面覆盖的一薄层金属箔。

㊀ 焊锡与铜面间在高温焊接过程中，必须先出现一种“接口合金共化物”层，才会出现良好的沾锡或焊锡性。当铜面不洁、热量不足，或焊锡中杂质太多时，都无法形成必须的接口合金共化物，将出现灰暗多凹坑不平且结构强度也不足的焊接点，系由焊锡冷凝而形成，但未真正焊牢的焊接点，俗称冷焊。——译者注

Conductive Pattern：导电图形

基材上导电物质的配置或设计，包括导线、焊垫、通孔连接等。

Conductor Base Width：导线的基本宽度

基材表面导线的宽度，见导体宽度（Conductor Width）。

Conductor Layer：导线层

基材上由全部导电图形形成的单独的一层。

Conductor Pattern：导线分布图

见导电图形（Conductive Pattern）。

Conductor Side：导线面

单面板包含导电图形的一面。

Conductor Spacing：导体间距、导线间距

印制电路板同一层中相邻的两个导体边缘的平均或最小距离（根据规定）。

Conductor Thickness：导线厚度

导线，包括所有金属覆膜的厚度。

Conductor-to-hole Spacing：线孔间距

导线边缘与支撑孔或非支撑孔边缘之间的距离。

Conductor Width：导线宽度

印制电路板导线上随意选择的某一点相关导线的观测宽度，除非是其他特殊的指定，通常由垂直于导线的正上方观测。

Conductor：导线

导电图形上独立的一条导电路径，印制电路板上至少有一层导线层。同义词为路径、线路。

Conformal Coating：护形膜、贴护层

刷、浸或喷在印制电路板部件或电路上的一层薄绝缘层，起到环境或机械保护的作用。

Connection：连接器

可以很容易的与其配对体连接或分离的插头或插座。多触点连接器在机械装配中将两个或多个导体相连接。

Connector Tongue：连接器舌片

印制电路板边缘的一个突出体，用来配置到与之相对应的插座中，以完成电路板间和电路间的电气连接或机械连接。

Contact Area：接触区域

导体和连接器之间的一个普通区域，电流通过此处流过。

Contact Resistance：接触电阻

在指定的条件下接口处接触区域内金属表面的电阻。

Contact Spacing：接触间距

相邻接触区域中心线之间的距离。

Contaminate/Contaminant：杂质

印制电路组装过程中混入的异物或不纯净的物体，它将导致发生电解、化学作用产生电流而腐蚀系统。

Continuity Testing：连通性测试

在两个互相连通的焊接点上施加电压来确信有无电流的一个测试过程。

Copper Clad：铜箔基板、敷铜板

基材的一面或两面披覆有一层薄铜箔的材料，通常以大张的薄板提供，同义词为基板。

Copper Foil-See Foil：铜箔

用来形成印制电路上导电图形的品质电解铜，多种重量的铜箔均是可用的，传统的重量是 $0.5oz/ft^2$、$1oz/ft^2$ 和 $2oz/ft^2$（$18\mu m$、$35\mu m$ 和 $70\mu m$ 厚）。

Copper-mirror Test：铜镜测试

一种助焊剂腐蚀性测试，记录助焊剂对玻璃板上真空沉积一层薄铜膜的化合反应。

Corner Mark：板角标记、拐角标记

标于印制电路板四角边缘内部的标记，用于校正和记录各层。

Corrosive Fluxes：腐蚀性助焊剂

用来形成弱焊接性物质表面的一种以无机酸和盐为主的材料，也称为酸性助焊剂。

Cosmetic Defects：表面缺陷

在焊接后由于助焊剂残留而在电路板上留下的污点或瑕疵，使其改变了传统的外观。

Coupon：板边试样、附连测试板

电路图区域图样质量一致性的一种测试，见板边测试（Test Coupon）[㊀]。

Cover Lay、Cover Layer、Cover Coat：表护层、保护层、覆盖层

印制电路板表面导电图形上涂的绝缘外层材料。

Cracking：裂缝

表层出现裂开或分离的一种情况，它可能一直延伸到底面。

㊀ 欲了解电路板内部品质，尤其是多基板的通孔结构，不能只靠外观检查及电性测试，还需对其结构做进一步的微切片显微检查。因此需在板边一处或多处设置额外的"通孔及线路"图样，作为监视该片板子结构完整性的解剖切片配合试样。品质特严者，凡当切样不合格时，该片板子也将不能出货。这种板边切片，不但可当成出货的品检项目，也可作为问题的对策研究及品质改进的监视工具。——译者注

Crazing：微裂纹

发生在基材内部，在织物交织处玻璃纤维与树脂分离的现象，表现在基材表面上面或下面出现分散的白色斑点或十字纹。

Crimp Contact：压接接触件、挤压接头

一类连接器的触片，其末端是空心的柱面形，可与插入的金属导线压接在一起。

Cross-hatching：开窗口、十字交叉区

将导电材料中大的导电面积以空隙图形分割[㊀]。

Cross-linking：交键、交叉链接、交连、交叉耦合

塑料分子链中活性原子之间化学联系的信息[㊁]。

Cross-talk：串信、串扰

在信号线之间由于能量的耦合而产生的不受欢迎的干扰。

C-stage Material Laminate：C 阶材料基板

树脂聚合体成为不易溶解和熔化的固态高分子树脂的阶段。

Cure：固化、硬化、硫化

物质经过加热和催化剂的作用或化学反应而改变其物理性质，通常是由液态变为固态。

Current-carrying Capacity：载流量

在规定的条件下，一根导线不致于造成印制电路板的电气性能或力学性能明显降低所能够连续载运的最大电流。

Cut：断路

开路。电路中不希望出现的电气连续性的断开，它阻止了电流的流动。

Cycle Rate：循环速率

一个元器件贴片名词，用来计量从拿取、到板上定位和返回的机器速度。

Database：数据库

相互关联的数据集合存储在一起，供一方或多方使用，这就避免了不必要的冗余。

Datum：基准

在印制电路板制造和检验过程中用来定位版面层图形而定义的点、线或面。

㊀ 电路板面上某些大面积导体区，为了与板面及绿漆之间都得到更好的粘接力，常将部分铜面去掉，而留下多条纵横交叉的十字线，如网球拍的结构一样，如此可化解掉大面积铜箔因热膨胀而存在的浮离危机。其蚀刻所得的十字图形称为十字交叉区，而这种改善的做法则称为开窗口。——译者注

㊁ 由众多单体经其分子键的接合形成热固型高分子聚合物，其连接的过程称为“交连”。也指通过交连形成的化学键。——译者注

De-bugging：排除故障、调试

在电子系统中的软件和硬件部分定位和修复故障的过程。

De-lamination：分层

指基层板各层的分离，或指多基板的金属层与树脂层之间的分离㊀。

Dendrite：枝晶体

由于电迁移而引起的在焊垫和线路周围长出的金属细丝。

Design Width of Conductor：导线设计宽度

布设总图上绘出或注明的导线宽度。另见导线基本宽度（Conductor Base Width）、导线宽度（Conductor Width）。

Device：电子组件

一个单独的电子元器件，通常是一个独立的个体，且非经破坏其功能状态无法再做进一步区分。

De-wetting：缩锡

焊接点的表面下陷，焊锡面支离破碎甚至露出不规则的沉积物，这说明金属底清除氧化物不彻底。

Dezincification：失锌现象、脱锌

一种与电相关的腐蚀，通常与双相的铜合金有关，即富含锌的 β 相从黄铜中有选择的滤出，常发生于铜焊接点暴露于盐或海水中时。

DFSM：干膜阻焊剂

“Dry Film Solder Mask” 的缩写。

Dice：芯片

两个或更多的晶圆。

Die：晶圆

电子元器件的一种无外壳、无引脚的形式，这些元器件可能是主动元器件，也可能是被动元器件，可能是离散的，也可能是集成的。

Dielectric Constant：介质常数、介电常数

电介质的一种属性，它决定了某一电位梯度内单位体积存储的静电能量。

Dielectric Strength：介质强度

在指定条件下，绝缘材料可以容忍的不被击穿的最大电压。（通常用伏特每单位厚度表示）

Dielectric：介质

泛指填充于两导体之间的绝缘物质，也可以表示内部结合层导体之间的距

㊀ 主要原因是彼此之间的附着力不足，又受到后续焊锡强热或外力的考验，而造成彼此的分离。——译者注

离。

Digital Circuit：数字电路

由集成电路和开关器件（工作于“开”状态或“关”状态）组成的电路。

Digital Logic Simulator：数字逻辑仿真器

用来验证数字电路（或它的一部分）设计的一种工具，它是将虚拟的测试信号加到虚拟的设计模型中。

Digitizing：数字化

将板面的孔位或导体位置，以其在 x-y 坐标上的数据表示方法。

Dimensional Hole：准尺寸孔

印制电路板中由物理尺寸或坐标值定位的孔，它不一定位于规定的网格交点上。

Dimensional Stability：尺寸稳定性

由温度、湿度、化学处理、老化或应力等因素引起尺寸变化的量度。(通常以百分率来表示)

DIP Soldering：浸焊法

通过将印制电路板与静态的熔融焊锡池表面相接触而在一次操作中将所有暴露的导电图形及引脚全部焊接的过程。

Discrete Component：分立元器件

在安装之前就已经制造完成的元器件，例如电阻器、电容器、二极管、晶体管等作用单一的元器件。

Dispersent：分散剂

一种化学品，加入水中增加其去颗粒的能力。

Disturbed Solder Connection：受扰焊接

在焊锡冷固的瞬间被焊接金属发生了相对的移动，造成焊接点表面出现非正常特征的焊接。(该焊接不能被接受)

Documentation：文件编制

关于装配的资料，解释基本的设计概念，元器件和材料的类型与数量，专门的制造指示和最新版本。

Double-sided Assembly：双面组装

两面均安装了元器件的印制电路板。

Double-sided Board：双面板

两面均有导电图形的印制电路板。

DPF：圆盘绘图格式

“Disc Plot Format” 的缩写。

Drag Soldering：拖焊

把已将元器件插接到通孔中的印制电路板有焊接端点的一面浸蘸到焊锡中，将其在静止熔融焊锡池的表面沿着一个方向水平的移过而完成焊接。

Drag-out：带出

板子浸液取出后对其溶液残留清洁程度的一种度量[㊀]。

DRC：设计规则检查

“Design Rule Check”的缩写，检查印制电路板的完整性，以便于短路、断路等故障被标示出来。

Drills：钻孔器

特别设计用来快速切除、研磨环氧玻璃材料的一种坚固的有硬质合金刀刃的工具。

Dross：浮渣

高温熔融的焊锡表面形成的氧化物及其他污染物。

Dry Film Resists：干膜阻剂

以基板感光薄膜的形式出现的一种覆膜材料，特别用来制造印制电路板和化学加工部件。干膜阻剂对各种电镀和刻蚀过程有抵抗作用。

Drying Time：干燥时间

在预热后重熔过程开始到达到重熔峰值温度之前这一段时间内，在这其间挥发性材料从锡膏中蒸发走。

Dual In-line Package（DIP）：双列直插封装（DIP）

具有竖直双排引脚线的一种元器件封装形式。

Dual Solder Wave：双波焊接、双波峰焊

在波峰焊中，第一个波多方向、冲力强，在各个方向上与之接触的表面都留有焊锡，紧跟着到达的第二个平滑波将部分已搭桥短路或冰尖等各种缺失逐一予以消除，以供表面贴装焊接使用。

Dummy Component：伪元器件

一种无晶粒的机械封装，用来实现布局工艺。

Durometer：硬度、硬度计

如橡胶、塑料等非金属硬度的一种度量，也指进行这种测量的仪器。

Edge Clearance：板边余隙

板面图形、元器件或以上两者与印制电路板边缘之间的距离。

㊀ 板子在湿式制作过程各槽站之间进出时，常因多孔而将前一槽溶液的化学品“带出”，经过水洗后仍可能有少许残迹，而被“带进”下一站槽液中，如此将会造成下一站槽的污染。故其间必须彻底水洗，以延长各槽液的使用寿命。——译者注

Edge Connector：板边连接器

连接器的一种，可能是镀金的板边接头或一排并列的小孔。

Edge Spacing：板边空地、边距

板面图形、元器件或以上两者与印制板边缘之间的距离，预留板边空地便于和板边连接器相接插。

Edge-board Contacts：板边接点

在靠近或印制电路板边缘上印制的一系列接点，目的是为了与其他的板边连接器相接插。

Electroless Copper：化学镀铜

用化学反应的方法在印制电路板上的导体或绝缘体表面镀一层铜箔，即不采用电流的镀铜方法。

Electroless Deposition：无电镀、化学镀、无电电镀、非电解电镀

从自动接触反应镀液中沉积出导体材料，而不利用电流。

Electron-beam Bonding：电子束粘接点

在真空中对电子束加热形成的终端[㊀]。

Electroplating：电镀

在导电物体的表面覆上一层电解沉积金属膜。将进行电镀的物体放在电解液中并接到直流电源相应的接线端上，将预镀的金属同样浸没连到阳极上，金属提供离子形成电极间的电流。

Embedded Component：嵌入元器件

作为印制电路板上一个完整的部件而制造的一种分立元器件。

Emulsion Side：药膜面

护膜上定义摄影图像的一面[㊁]。

Entrapment：夹杂物

进入并被截留到板子中的空气、助焊剂、烟气等破坏性物质，它是由于被污染或镀液不洁引起的。

Epoxy Resins：环氧树脂

用于形成直链热塑性塑料和热硬化性树脂的具有良好力学性能和尺寸稳定性的材料。

Epoxy Smear：环氧胶渣

㊀ 组装方面也可利用电子束的热能，在真空中进行小面积的精准熔接。——译者注

㊁ 黑白底片或棕色底片，在透明片基的一个表面上涂有极薄的感光乳胶层，作为影像转移的媒介工具。当从已有图案的母片要翻照出“光极性”相反的子片时，必须谨遵“药面贴药面”的基本原则，以消除因片基厚度而出现的折光，减少新生画面的变形走样。——译者注

在钻孔过程中沉积在导电图形表面或边缘的环氧树脂，也称为树脂胶渣[一]。

ERBGF：环氧树脂玻璃纤维板材

"Epoxy Resin Bonded Glass Fibre"的缩写，见玻璃纤维胶片（FR-4）。

ERC：电气规则检查

"Electrical Rule Check"的缩写，对电路完整性做的一种检查，以便标识出输入开路、输出断路等类似的故障。

Escape Rate：遗漏率

有缺陷的产品却没有被检测出来的数目与全体被检测产品数目的百分比。

ESD Sensitivity：静电放电敏感性

指设备消散放电能量或耐受所产生电流的能力。

ESD：静电放电

"Electro-Static-Discharge"的缩写，指由一个物体到另一个物体突然发生的静电转移或放电。

Etch Factor：蚀刻因子、蚀刻函数

刻蚀深度（导体厚度）与侧蚀凹度的比值。

ETCH Resist：蚀刻阻剂

阻止板面上特殊的金属区域不被刻蚀剂侵袭的一些有机油墨、漆类、光阻材料、自粘性塑料带、金属镀层以及一些其他材料。

Etchant：蚀刻剂

采用化学反应的方法，用来去除印制电路板上不需要的部分材料的一种溶液。

Etch-back：回蚀、凹蚀阴影

有控制的去除通孔内壁基材上的树脂，以便显露出内层导体区域[二]。

Etched Printed Board：蚀刻印制电路板

印制电路板通过化学方法将不希望出现的导电铜箔去除，形成需要的导电图形。

Etching：蚀刻

[一] 以环氧树脂为底材的FR-4基板，在进行钻孔时由于钻头高速摩擦而产生强热，当其高温远超过环氧树脂的玻璃态转化温度时，则树脂会被软化甚至熔化，将随着钻头的旋转而涂布在孔壁上，称为环氧胶渣。若所钻孔处恰有内基板的铜环时，则此胶糊也势必会涂布在其铜环的侧缘上，以致阻碍了后续铜孔壁与内层铜环之间的导电性。因而多基板在进行镀通孔制作过程之前，必须先妥善做好"除胶渣"的工作，只有这样才会有良好的品质及可靠度。——译者注

[二] 早期军用多基板或高品级多基板，为了要得到更好的可靠度，在钻孔后清洗孔壁胶糊渣之余，还进一步要求各介质层的退后，使各内层孔环得以突出，以在孔壁完成镀铜后，可形成三面包夹式的钳合。此种使介质层被溶蚀而被迫退缩的制作过程称为回蚀。——译者注

利用化学溶液从印制电路板表面去除金属。在该过程中，常通过将印制电路板上准备留下的金属区域遮盖的办法来实施选择性刻蚀。

Exotherm：放热

树脂在硬化的过程中所表现出的温度变化与时间的特征曲线。

Extraneous Copper：附加镀铜

化学处理后不希望出现的镀铜仍然留在基材上。

Eyelet：铆眼、套眼

可插在印制电路板或接线端的空心金属管，以便为元器件引脚提供机械支持或电气连接。

Fault List：故障列表

关于将要维修的印制电路板开路和短路故障的一张表格。

Feed-through：导通孔

印制电路板上对位于板子两面的印制导线提供电气连接的镀通孔，由于它不是用来安装元器件引脚的，因而通常只是一个小孔或小直径的焊垫。

Fibre Exposure：玻璃纤维显露、露纤维

基材板上破裂的增强纤维在机械磨损区域暴露或突出出来的一种情况。

FICS：闪光扫描图像控制软件

“Flashscan Image Control Software”的缩写，一个将Gerber档案发送到绘图仪的DOS程序。

Fiducial：基准点

印制电路板的底片和蚀刻电路板共有的一种标记，它用来识别板子上底片的方位。全局基准定位全部的图样，局部基准强调元器件的位置，特别是小引脚距元器件。

Fillet：焊脚

在焊垫与元器件引脚之间由焊锡形成的凹形内圆填角[⊖]。

Fine line design：细线设计

印制电路设计中相邻引脚间允许两条走线，目前甚至允许三条走线，称为细线设计。该工艺中必需使用感光防焊绿漆。

Fine pitch：紧密引脚距

指芯片封装引脚的距离小于1.25mm或25mil。

Finger：板边金手指

板边连接器镀金的接点。

First Pass Yield：初检良品率

⊖ 以增强该处的机械强度及方便电流的流通。——译者注

制造完工的产品通过所有的检测而不必返工的百分比。

Fixture：针盘

一种工具，使印制电路板与弹簧触电探针相接触，以便进行电测试。

Flat Cable：扁平排线

在同一平面上被绝缘材料所包封的两条或两条以上的导线，其导线本身可以是圆形的，也可以是扁平的。

Flexible Printed Wiring：柔性印制线路

利用带有或不带有柔性表层的柔性基材制作的印制线路。

Flexure Failure：弯曲故障

由于反复弯曲而造成的一种导线故障，表现为电阻值在某一规定时间内高于某一指定值。

Flood Bar：覆墨刀：

丝网印制机的一种装置，在刮刀运行一个冲程后，将焊锡膏拖回到起始点。

Flow Soldering：流焊

也称为波峰焊，印制电路板焊接的一种方法。焊接时在焊锡池中将印制电路板移过流动的熔融焊锡波。

Fluorocarbon：碳氟化合物

一种结构中含有氟原子的有机化合物，可用来增加塑料的化学稳定性和热稳定性。

Flush Conductor：贴平式导体

导体外表面与相邻绝缘材料表面处于同一平面的导体。

Flux：助焊剂

一种能促使熔融的焊锡与金属结合而完成焊接的物质，例如将被焊金属表面氧化物予以清除的物质。

Flux Residue：焊接残余

焊接后在板面上或附近残留的一种与助焊剂有关的污垢物，如果有可能，应予以去除。

Flux，Activated Rosin Flux：助焊剂、活性树脂钎焊剂

一种由树脂和少量有机卤化物或有机酸等催化剂组成的混合物，其作用是提高助焊剂去除被焊金属表面氧化物的能力。

Flux-cored Solder：焊剂填充焊锡丝

沿其长度内部含有一个或多个用来填装焊料的连续空腔的焊锡丝。

Foil：金属箔

一薄层金属，通常是铜，用来作为印制电路的导体。

Footprint：脚垫

见连接盘图形（Land Pattern），使印制电路板上用来安放和焊接 SMD 的一系列具有严格尺寸和位置的焊垫。另外，脚垫也指板子上 SMD 及其安装焊垫占用的区域。

Footprint：连接盘图形

板子上元器件所占用的图样和区域。

Forced-air Convection：强迫吹风对流、强迫通风对流

回流过程中焊接点周围的液体或气体中热量的转移，包括流量、速度、温度等因素。

FR-4：玻璃纤维胶片

由玻璃纤维织材浸透环氧树脂而制成的一种阻燃基片。

Fully-additive Process：全加成法

一种加成过程，在非导体的基板表面，以无电沉积铜层的方法生长出选择性电路的方法。

Functional Test：功能测试

采用一种嵌入了输入输出系统，用来测试设计功能的设备来检查电路板。

Fused Coating：熔锡层

通常是由锡或焊锡构成的一个金属淤积层，经过高温熔融固化后形成基材上的一个金属结。

Gas Blanket：气层

一种流动的用来防止金属氧化的惰性气体。

Gerber：Gerber 档案

由 Gerber 科学设备公司发明的一种基于矢量的语言，用于向绘图机发送命令。

GI：

一种由浸透聚酰亚胺树脂的玻璃纤维织材制成的基板。

Glass Epoxy：玻璃纤维环氧树脂

用来制造印制电路板的一种材料。先将基材（玻璃纤维材料）浸透到环氧填料中，然后需将铜材覆到其外表面以形成制造印制电路板所需的原料。

Glass Transition Temperature：玻璃态转化温度、玻璃态转变温度

T_G 值，在该温度下树脂不再表现为固态，到达这一温度后，开始发生树脂与铜箔的分离。

Glob Top：圆顶封装体

将一些树脂涂覆到板子某一部分或芯片顶部的过程。这些树脂扩散到芯片的整个表面，就形成了一个固态的保护覆层。

Go/No-Go Test：通过/不通过测试

只有通过或不通过两种结果的测试。

Grid：标准格、网格

两组等距离平行直线正交而成的网络，它用于元器件在印制电路板上的定位。

Ground Plane：接地层

为导体层或导体层的一部分，用作电路的公共回路、屏蔽或散热的公共参考点，印制电路板上所有这些不被引线或焊垫使用的区域与板子的地相连。

Ground Plane Clearance：接地层隔离

接地层上孔周围蚀刻掉一部分，使基材上接地层与孔隔离开来。

Guided Probe Method：引入检测法

一种基于输入检验找出绝大多数设备故障的印制电路板批量生产技术，检测优先于板上组装，这将消除多数的制造缺陷。

Gull Wing Lead：鸥翼接脚、翼形引脚

一种 SMD 的引脚，它由器件体张开向外伸出。

H. D. I.：高密度互连

“High Density Interconnect” 的缩写。

Halides：卤化物

含有氟、氯、溴或碘的化合物。是助焊剂中的催化剂部分，由于其腐蚀性，必须清除。

Halogenated Polyester：卤化聚酯

用卤素改变聚酯的性质以减少可燃性。

Haloing Mechanically：机械白边、机械白圈

在基材的表面或下面引起裂纹形成或分层的现象，它通常产生于通孔周围的亮区或其他经机械加工的区域。

HASL：热风整平

“Hot Air Solder Level” 的缩写，见喷锡（Solder Levelling）。

Heat and Pull：热除锡

一种除锡的方法，用工具抓紧，加热、拔除即可除去的引脚。

Heat Sink：散热器

从一个热的物体吸收热量，再将这些热量发散到周围空气中的装置。

Heel, Bonding：结合点

已经被焊接工具弄变形的元器件终端引脚的一部分。

Hipot Test：高压电测

在装配期间使元器件经受一个高的电压电流[㊀]。

Hole Breakout：孔位破出

孔壁未能受到孔环完全包围的一种情况。

Hole Density：孔密度

印制电路板中单位面积的孔数量。

Hole Location：孔位

钻孔中心点的坐标位置。

Hole Pattern：孔图

印制电路板上所有孔的位置安排图。

Hole Pull Strength：孔壁强度、孔拉脱强度、孔壁抗拉强度

沿着镀通孔轴的方向将孔拉断裂所需的力。

Hole Void：破洞、孔壁空洞

指镀通孔中金属沉积有破洞而暴露出基材。

Hot Zone：热区

回焊炉保持最高温度的一部分，其他部分包括预热区和冷却区。

Hygroscopic：吸湿性

指物质从空气中吸收并保持水分的性能。

IC：集成电路

"Integrated Circuit" 的缩写。

Indentation：压痕

见凹点（Pit）。

Immersion Plating：浸镀

通过对部分金属基材发生化学置换作用而在其表面形成一薄层金属沉积物。

Impedance, Characteristic：性能阻抗

平行导体结构对其上流过的交流电流的阻抗，它通常应用于高速电路中，在一定的频率范围内其阻抗值为一个常数。

In-circuit Test：组装板电测试

在不与主电路去耦的情况下对组装板上特殊的元器件和电路进行的测试。

Inclusion：异物

在导电层、电镀层或基材中混有的外来杂质。

Index Edge, Index Edge Marker, Indexing Hole, Indexing Notch, Indexing Slot：见定位孔（Locating Edge）、定位槽（Location Edge Marker）等。

㊀ 采用比在实际使用时更高的电压进行仿真通电的电性试验，以检查出可能漏失的电流大小。——译者注

Initiating：见活化（Activating）

Inspection Lot：检查抽样

用于鉴定的从产品中抽取的单位产品的集合，作为特殊的实体，用来取样、测试以确定是否符合可接受性标准。

Inspection Overlay：套检底片

由工作底片制成的透明的线路阴片或阳片，用以套准在板面上作为对照目检的工具。

Insulation Resistance：绝缘阻抗

介于任意对接点、导体或各种组合的接地元器件绝缘材料（在某种条件下确定）的电阻。

Insulation Resistance：绝缘阻抗

介于任意一对接点或导体之间绝缘材料（在特定条件下确定）的电阻。

Inter-facial Connection：表面间连接

见贯穿连接（Through Connection）。

Inter-layer Connection：层间连接

多层印制电路板不同层导电图形之间的电气连接。另见贯穿连接（Through Connection）。

Internal Layer：内层

完全夹在多层印制电路板中间的导电图形。

Interstitial Via Hole：局部层间导通孔

在多层印制电路板中连接两个或多个导体层的镀通孔，但它并不完全穿过板子基材所有的层。

IPC：电子电路互连与封装协会

“The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits”的缩写，电子电路互连与封装协会，一个美国组织。

Isolation：隔离（性）

焊垫、线路以及通孔与距其最近的另外一个含信号导体之间的间距品质。

J-Leads：J形接脚、J形引线

是塑料芯片载体常用的表面贴装引脚形式，之所以这样命名是因为引脚沿着封装体的 z 轴中心线向下延伸并在封装体下面向外卷起，其形状就像英文字母J一样。

Jumper：跳线

预定的导电图形形成之后，加在印制电路板两点之间的属于原来设计的电气连接。

Just-in-time（JIT）：适时供应

通过直接在投入生产前供应材料和元器件到生产线，以把库存降到最少。

Kapton：聚亚酰胺软材、聚酰亚胺薄膜

杜邦公司聚酰亚胺薄片的商品名。

Key：钥槽

设计用来保证一对组件插接时只能以一种固定的方向而不致插反的装置。

Keying Slot or Polarizing Slot：键槽、偏置定位槽

印制电路板上的偏置定位槽口，使印制电路板只能将排线引脚正确插入与之配合的连接器中，防止其插反或插入其他连接器的槽口中。

Keyway：键槽

配对连接器中用来保证正确定位的一个小槽。

Laminate：层压板

由两层或更多层各种材料压合在一起的产品[㊀]。

Laminate Thickness：板材厚度

覆铜基板的厚度，覆铜基板是后续处理过程的基础，它可以是单面的，也可以是双面的。

Laminate Void：压合空洞

通常本应包含板材的区域缺乏板材[㊁]。

Laminating Presses：层压压机

用来制造多基板的设备，可完成对基板的加压、加热以及预浸处理。

Lamination：压合、压膜

制造层压板的过程，也指敷用干膜阻剂的过程。

Land Pattern：连接盘图形

用来安装、互连、测试特殊元器件连接盘的结合体。

Land：焊垫、连接盘、焊盘

印制电路板上用于电气连接或固定组件的导电图形，也称为焊盘。

Landless Hole：无环通孔、无连接盘导通孔、无焊盘导通孔

㊀ 是指用以制造电路板的基材板，也称基板。层压板的构造是由树脂、玻璃布、玻璃纤维布或白牛皮纸所组成的胶片作为粘结剂层。即将多张胶片与外覆铜箔先经叠合，再于高温高压中压合而成的复合板材。其正式学名称为铜箔基板——译者注

㊁ 指完工的基板或多基板中，某些区域在树脂硬化后，尚残留有气泡未及时赶出板外，最后终于形成板材的空洞。此种空洞存在于板材中，将会影响其结构强度及绝缘性。若此缺陷不幸恰好出现在钻孔的孔壁上时，则将形成无法镀满的破洞。另外也常指多层压合时排气不及所产生的“空洞”。——译者注

没有焊垫的镀通孔。

Laser：激光

“Light Amplified by Stimulated Emission of Radiation” 的缩写。

Layer-to-layer Spacing：层间距离

多层印制电路板中相邻导体层之间的绝缘材料厚度。

Layer：层

电路板上一系列的水平薄层，其上有导电通道用来连接各层之间的元器件、通孔连接线及区域。

LCCC：瓷制无脚芯片载体

“Leadless Ceramic Chip Carrier” 的缩写。

Lead：引脚

元器件的端子。

Lead Mounting Hole：引线安装孔

见组件孔（Component Hole）。

Lead Projection：引线突出

元器件引线突出穿过安装该元器件电路板板面反面的距离。

Legend：字符

印制电路板上字母或符号的一种格式，例如部件号、元器件位置以及图样等。

Lifted Land：孔环浮起、连接盘起翘

孔环全部或部分的与基材分离，而不管周围的树脂是否随孔环浮起[⊖]。

Line：传输线、导线

见导线（Conductor）。

Liquation：熔析

如果有较大熔化温度范围的合金焊料被加热的太慢，则有最低熔点的成分首先开始熔化，剩下的合金就改变了成分具有较高的熔点而不易熔化。熔析带来的后果通常为导致焊接点不牢靠。

Liquids：液化温度

焊锡变为完全液体状态的最低温度。

Load Test：负载试验

⊖ 电路板的通孔其两端都配有孔环，如同鞋带扣环一样牢牢的紧固在鞋面上。当板子在组装焊接时受到强热，将会产生 x、y，及 z 方向的膨胀。尤其在 z 方向上，由于基材中“树脂部分”的膨胀将远大于通孔的“铜壁”，因而连带孔环外缘也被顶起。由于铜箔的毛面与板材树脂之间的附着力已受到此膨胀拉扯的伤害，故当板子冷却收缩时，孔环外缘部分将无法再随树脂而缩回，因而出现分离浮开的现象。——译者注

通过反复对电路板处理而对成批回流焊接系统进行的一种测试，该测试与通过回焊炉的电路板批量无关。

Locating Edge，Locating Hole，Locating Notch，Locating Slot：定位孔、定位槽

印制电路板或板卡的一种物理结构，用来精确的定位板子和贴装元器件。

Locating Hole，Locating Notch，Locating Slot：定位孔、定位槽

在制造或装配过程中为使印制电路板精确定位而开的孔或槽，其同义词有：组装孔（槽）、参考孔、基准孔、制造孔、支架孔等。

Logic Diagram：逻辑图

用逻辑符号和补充标记描绘多状态器件实现逻辑功能的图，它表示出了详细的控制和信号流程，但不一定表示出点与点的连接。

Major Defect：严重缺陷

可能导致失败或大大减少电路板可用性的缺陷。

Manhattan Distance：曼哈顿距离

两点之间的垂直距离。

MAR（Minimum Annular Ring）：孔环下限

电路板孔环处圆垫的外缘与孔边缘最窄点处的最小金属宽度。该度量用来衡量多层印制电路板内层钻孔以及多基板和双基板外层电镀缘精准与否[㊀]。

Margin：边距

扁平排线的参考边缘与距其最近的导体边缘的距离。另见板边空地（Edge Spacing）。

Mask：阻剂

应用后可以使印制电路板进行有选择的刻蚀、电镀、焊接的材料[㊁]。

Mass Soldering：成批焊接

在同一操作中完成许多焊接点的一种焊接方法。

Master Artwork：原始底片

标明所有元器件装配在电路板上时的空间限制和格子位置的文件，它包括导体和非导体图样的安排、大小、类型以及钻孔的位置。

Master Dot Pattern：钻孔布设图

㊀ 当板面上各圆垫经钻孔后，围绕在孔外的“孔环”，其最窄处的宽度将作为检测的对象，而规范上对该处允收的下限值，称作“孔环下限”，这是印制电路板品质与技术的一种客观标准。由于圆垫的制作在先，而钻孔加工的呈现孔环在后，两种制作过程工序之间的配合必须精确，稍有闪失即不免出现偏歪，造成孔环的幅度宽窄不一致。其最窄处须保持的宽度数据、各种成文规范上都已有规定。——译者注

㊁ 将电路板不欲进行处理的部分加以遮盖掩蔽，这种遮蔽膜称为“阻剂”。——译者注

见孔图（Hole Pattern）。

Master Drawing：布设总图

标明所有元器件装配在电路板（刚性印制电路板或软板）上时的空间限制和格子位置的文件，它包括导体和非导体图样的安排、大小、类型以及钻孔的位置。

Master Pattern：原始图形

用来制作印制电路的一种精确尺度图形，其精确度在布设总图的指定范围内。

Maximum，Plated Through-hole Size：镀通孔尺寸上限

该通孔尺寸等于电镀前规定的通孔尺寸加上制造允许的误差，再减去最小镀层厚度的两倍。

MCR：模制垫圈

"Moulded Carrier Ring" 的缩写。一种具有精细引脚间距的芯片封装形式，该方法用于支持和保护引脚，使引脚保持竖直，引脚的另一端嵌入到一排塑料模制垫圈中。

Mean Time between Failure（MTBF）：平均故障间隔时间

预料可能的运转单元失效的平均统计时间间隔，通常以每小时计算，结果应该标明实际的、预计的或计算的。

Measling：白点、白斑

发生在板基材上的一种情况，在板基材表面的下面出现离散的白色斑点或十字，它反映了板基材玻璃布在其经纬纱交织点处与树脂间发生局部分离。

MELF：金属电极无引脚端面元器件

"Metal Electrode Leadless Face" 的缩写，金属电极无引脚端面元器件是一种SMD，末端有圆形的金属帽。

Melting Range：熔化范围

焊锡等合金熔化的温度范围。具有惟一熔点而不是熔化范围的合金称为共晶合金。

Meniscus：弯月面

熔化的焊锡由于受表面张力以及沾锡现象的共同约束而形成的轮廓或形状。

Metal Clad Base Material：覆金属箔基材

一面或两面均覆有金属的基材。

Metallization：金属化

沉积或电镀一层金属薄膜以便利用它的保护性能或导电性能。

Micro-sectioning：微切片法

一种破坏性测试程序，一部分样本被切割拿走做更详尽的测试[一]。

Micro-strip：微条线

导体浮于大地层之上，二者保持平行，中间由介质隔开的一种传输线结构。

Mil：密耳

千分之一英寸，不要与另一个长度单位“Millimetre 的缩写”相混淆。1in = 25.4mm，1mil = 0.0254mm。

Minimum Electrical Spacing：电性间距下限、下限电性间距、最小电气间距

在任意给定电压幅度下，相邻导线间足以防止介质击穿所允许的最小距离。

Minor Defect：次要缺陷

看起来不会减少组件计划用途可用性的缺陷。该缺陷使得与已经制定的标准有偏离但不会给组件的有效使用和操作带来显著的影响。

Mis-registration：对不准

在一系列制造性能上缺乏空间的一致性[二]。

Mixed Component-Mounting Technology：混合零件组装技术、混安装技术

在同一个封装互连机构体中，同时采用通孔装插和表面贴装技术的零件组装技术。

Modifier：调节剂、改良剂

加到树脂中以改变其性质的一种化学添加物质。

Module：模块

在封装电路中具有空间范围规律性的独立单元。

Mother Board：母板

也称为主构板或基板，是一块相对较大的印制电路板，其他一些模块、接口、下级组件或其他的印制电路板可以安装在上面，通过母板上的印制导线互连互通。

Mounting Hole：安装孔

用来机械安装印制电路板或将组件机械固定于印制电路板上所使用的通孔。

Muffle：隔焰甑

[一] 它是对电路板的板材组织结构与板材在各制作过程站的细部品质以及零件组装情况等，在微观下做进一步深入了解的一种技术，是一种公认的品检方法。将正确抛光与小心微蚀后的切片试样放大 100～400 倍，各种细部详情均将一览无遗，而多数的问题根源也会暴露出来。不过微切片正确判读所需的知识，却远超过其制作的技术。此种微切片法是源自金属材料及矿冶科技的学问领域。——译者注

[二] 在电路板业是指板子正反两面，其应相互对齐的某些成员（如金手指或孔环等）一旦出现偏移，就称为“对不准”。此词尤指多基板其各通孔外，所套接各层孔环之间的偏歪，称之为“层间对不准”，此词也称为“不重合”。——译者注

位于加热设备与被加工部件之间的一种附件，它包含回流焊接制作过程所需要的空气。

Multi-layer PCB：多层印制电路板

包含有三层或更多层导体电路层的印制电路板，这些导体电路层由绝缘材料隔离，在需要的地方由内部接线或外部接线相联系。

Multimeter：万用表

一种可以用来测量电压、电流和电阻的手提测试仪表。

Multiple-image Production Master：复像印制电路模板，复像生产底片

一种生产底片，用来同时制造两块或更多块印制电路板。

Nail Heading：钉头

多基板中由于钻孔造成的内层孔环上铜箔沿孔壁扩张的现象[1]。

Negative（Noun）：负片、负像

各种底片、原始底片或生产底片，其导电图形在光照下是透明的，没有导电图形的区域则是不透明的。

Negative-acting Resist：负型阻剂、负性抗蚀剂

一种感光后能产生聚合反应（硬化）的阻剂，可以在板面感光区域上留下已聚合的阻剂图形[2]。

Netlist：网表

一个网格就是一个元器件的汇结点，网表文件就是定义电路所有连接的网格的集合，它可以从电路原理图中自动获得。

Neutralizer：中和剂

一种碱性的化学物质，将其添加到水中用来提高溶解焊剂残留物的能力。

NFP：非功能焊垫

“Non-functional pad”的缩写。

Node：节点

至少有一条导线连在上面的引脚、引线以及汇结点上。

Non-clean Solder：免清洗焊接

---

[1] 多基板在钻孔后，其内层孔环在孔壁表面所呈现的厚度比起原始铜箔来的更厚，其原因是钻头尖部的刃角，钻过多孔失去原有的直角而呈现被磨圆的形状，致使对铜箔切削不够锐利，强行推挤之下，造成孔环内缘侧面出现如“钉头”的现象。通常内层铜环发生严重钉头时，其孔壁树脂部分也必定粗糙不堪。新钻头或正常重磨的钻头就不会发生严重的钉头。一般规范对钉头的允收标准是“不可超过所用铜箔厚度的50%”。——译者注

[2] 在板面上留下聚合的阻剂图形与原始图案相反，这种感光阻剂称之为“负型阻剂”，反之，能产生感光分解反应，板面的阻剂图案与底片完全相同时，则称为正型阻剂。负型阻剂较便宜，正型阻剂相对价格比较贵。——译者注

一种采用特殊配方的低固体性焊接膏的焊接过程，焊接的残留物不需要清洗。

Non-conductive Epoxy：非导电环氧树脂

环氧树脂的一种，可能添加或不添加用来提高热传导性能的填充料。

Non-conductive Pattern：非导电图形

印制电路板的非导电材料形成的图形。

Non-functional Land：非功能焊垫

内层或外层上不与该层的导电图形相连接的焊垫。

Non-polar Compound：非极性化合物

分子的表面分布有电荷，因此在溶液中会表现出电效应的物质。

Non-wetting：不沾锡、不润湿

被焊接的金属表面已经接触到熔化的焊锡，但没有焊锡沾到金属表面的一种现象。

NPTH：非导通孔

“Non plated though-hole” 的缩写。

Omegameter：奥米伽表

一种测试仪表，通过测量在某一特定时间内电阻率的下降[㊀]，来衡量印制电路板表面离子的残留量。

One-side Board：单面板

见单面印制电路板（Single-sided Board）。

Open：断路

由于过蚀刻或制造的问题，印制电路板裸板上的某区域将两个电连接点分开。

Organic Activated（OA）：有机活性剂

一种可溶于水的用有机酸作为催化剂的助焊剂。

OSP：有机保焊剂

“Organic Solderable Preservative” 的缩写。

Outgassing：出气、吹气、逸气

当印制电路板的组装暴露在高热或减压环境中时，有气体从印制电路板基板或元器件中喷射出来的现象[㊁]。

㊀ 由于离子残留而引起的。——译者注

㊁ 电路板在进行镀通孔制作过程时，若因钻孔不良造成孔壁坑洞太多，而无法让化学铜层均匀的铺满，以致于存在着曝露底材的“破洞”时，则可能在各种湿制程中吸收水分，而在后来高温焊接制作过程中形成水蒸气向外喷出。吹入孔内尚处在高温液态的焊锡中，将在后来冷却固化的锡柱中便形成空洞。这种自底材铜壁破洞向外喷出水蒸气的现象称为吹气。而发生吹气的不良镀通孔则称为吹孔。——译者注

Outgrowth：悬出、横出、侧出、镀层情况

由于镀层的积累，超出生产底片上描绘的轮廓线，导致导线宽度的增加[1]。

Overhang：总浮空、镀层突出

由于镀层积累以及蚀刻过程中的侧蚀导致的印制电路线宽度的增加，二者的总和称为总浮空。

Packaging Density：装配密度

每单位体积的功能数量（元器件、互连设备、机械设备），通常用定性的术语来表示，例如高、中或低。

Pad：垫，盘

用于元器件、接线端、线路等机械连接的一部分导体区域。另见焊垫(Land)。

Panel：制作过程板

通过一系列生产程序制造的包含一个或多个电路板面图形的基材板，可将其分割制成印制电路板。另见支撑板（Backplanes）、主构板（Backpanels）。

Panel Plating：全板镀铜、整板电镀

整个板面的电镀，包括通孔。

Parylene：聚对二甲苯

一种聚合树脂，为印制电路板和元器件提供一层薄的均匀涂层，它可以应用在陡沿和形状复杂的型材上进行真空沉积。

Pattern Plating：线路电镀、图形电镀

导体图形的选择性电镀。

Pattern：板面图形

印制电路板的导电区域与（或）非导电区域的构形，也包括板上的字母和题字，还指在有关照相底版和图纸上的相应构形。板面图形也可以表示相关工具，如布设图与底片的电路配置，其同义词为图像。

PCB：印制电路板

“Printed Circuit Board” 的缩写。

PEC：印制电子器件

“Printed Electronic Component” 的缩写。

Peel Strength：剥离强度

从基板上剥离导线或金属箔单位宽度所需的垂直于板面的力。

Permanent Mask：永久性阻剂

---

[1] 当镀层在不断增厚的情况下，镀层会超过阻剂（如干膜）的高度而向两侧发展，此种横生部分从它的截面上看，即被称为悬出。——译者注。

在加工完成后不去除的一种阻剂，例如在全加成过程中使用的电镀阻剂。

Photomaster：原始底片

见原始底片（Artwork Master）。

Photopolymer：光敏聚合物、干膜

一种暴露在特殊频率的光照下就改变性能的聚合物。

Photoplotter：光学绘图机

用光来写入的绘图机。

Physical Layer：物理层

代表全部导电层的一种导体板层或底片影像。

Pick-and-place Machine：拾取-贴装设备

一种可编程机器，有一个机械手臂，从自动供料器拾取元器件，移动到电路板上的一个定点，以正确的方向贴放或插入到指定的位置。

PIH Assembly：通孔引脚组装

通孔引脚印制电路板组装时，采用带有引脚的元器件，将其引脚插入到板子或焊垫的通孔中。其同义词有传统组装、常规组装。

Pilot Hole：引导孔

见定位孔（Locating Hole）。

Pin Density：引脚密度

印制电路板上单位面积的引脚数量。

Pin：引脚

元器件上的接线端，元器件的引脚在不受破坏的情况下是不容易改变形状的。

Pinhole：针孔

穿过板面图形层的微小的孔。

Pinholes：针孔

完全穿过导体和（或）焊锡的小缺陷[⊖]。

Pink Ring：粉红圈

基材表面或下层由于化学反应而导致的破裂或分层，通常表现为通孔周围或其他刻蚀区域出现的亮区。

Pit：凹点、麻点

没有完全穿透导电层的一种凹陷。

⊖ 各种表层上能见到底材的透孔均称为针孔，在电路板上则专指线路或孔壁上的外观缺点。电路板上四种程度不同的缺陷分别称为凹陷（Dents）、凹点（Pits）、针孔（Pinhole）与破洞（Voids）。——译者注

Pitting：小孔、烧熔边缘

焊接点表面上的小孔或尖锐的边缘，通常由于焊剂滞留、氧化或过度加热而引起。

Plate Finish：原始光洁面

与层压有关的一个概念，覆铜板从层压机中取出来未经后续工序整饰的金属箔表面，即与层压模板直接接触形成的原始表面。

Plated Through-hole：镀通孔

孔壁上有一层金属（通常是铜）沉积膜的通孔，用来提供内层导电图形与外层导电图形的电气连接。

Plating Bar：电镀棒、电镀杆

将印制电路板上欲进行电镀的区域互连起来的临时导电路径，通常位于板制作过程外侧的边缘部分。

Plating Resists：电镀阻剂

沉积到导电区域上的一种材料，用来阻止对覆盖区域的电镀，它可作为网版材料或干膜光敏聚合物阻剂使用。

Plating Up：电镀

基材完成导体的制作后，在基材导体材料上（如表面孔等）进行的电化学沉积过程。

Plating：镀层

印制电路板基材上均匀的金属导电涂层。

Plotting：标绘

以机械方式将 X-Y 等位置信息转换成视觉模式图形的作业过程，例如底片的制作。

Poise：泊

粘滞度的单位（采用厘米/克/秒制），等于流体需要 1 达因[1]的剪力以 1cm/s 的速度从 $1cm^2$ 的面积中移出。

Polarization：分极、极化

在某一平面内消除对称性的一种技术，以便部件只能以一种方式来接插，使可能发生的机械和电气故障、破坏最小化[2]。

Polyester（Mylar）：聚酯（迈拉）

---

[1] 在物理学中，达因是一个力的单位，特别用于厘米/克/秒制的单位系统，符号是“dyn”，1 达因等于 $10^{-5}N$，它还可以定义为使 1g 质量加速到 $1cm/s^2$ 所需要的力。——译者注

[2] 例如在执行电工作业时，需将插头插入电源插座中，以达到电流的连通及做功。为了防止其极性插反插错，而造成电动机或机械上的损失，特将插头与插座的两极做成不对称的形式，使其只能有一种方式可以插接以防错误，称之为“分极”——译者注

用来制造柔性电路的一种低熔点的塑料薄膜。

Polyimide Resins：聚酰亚胺树脂

一种耐高温热塑性塑料，与玻璃一起用来制造印制电路板基板，可制造多基板及其他需要优良高温性能的电路应用器材。

Polyimide：聚酰亚胺

用来制造柔性-刚性板中的柔性部分以及许多柔性电路的基本材料，是一种高熔点的塑料薄膜。

Populated PCB：组装印制电路板

所有主动和被动元器件均已安装的印制电路板，同义词有印制电路板组装(PBA)、板卡、组装板。

Positive：正片

一种底片，原始底片或生产底片，其上设计的导电图形对光是不透明的，除导电材料外的空余部位是透明的。

Positive-acting Resist：正型光阻剂、正性抗蚀剂

光照后发生分解（软化）的一种阻剂，曝光显影后，可由生产底片的明区部分经冲刷而被除去。

Pre-heat：预热

回流加热曲线的一部分，回流加热中印制电路板的焊接点区域以预置的速率从环境温度加热到完整液相曲线[1]。

Prepreg：半固化片、预浸材料

由浸透合成树脂的基材组成的片材，例如环氧树脂，已经部分的硬化到了B阶段。

Press-fit Contact：挤入式接触

可以挤压到印制电路板上小孔中的电子引脚触点，以完成快速的接触[2]。

Primer：底层涂料、底漆

在使用粘结剂增强粘接性之前使用的涂敷层。

Printed Board Assembly：印制电路板装配

采用如焊接、涂敷等各种制造工艺，将电子或机械元器件、其他印制电路板或上述部件总和安装到印制电路板上。

Printed Board：印制电路板

---

[1] 使工作物在进行高温制作过程之前，需先行提升其温度，以减少瞬间高温可能带来的热冲击，这种热身的准备动作称为预热。——译者注

[2] 注意像板边金手指，插入另一半具有弹簧力的阴性连接器卡槽时，与此种挤入式接触并不相同。——译者注

印制电路或印制线路配置工艺的通用术语，包括单基板、双基板和多基板，还可以分为刚性板和柔性板。

Printed Circuit Assembly：组装印制电路板、印制电路板装配

已经装配了分立元器件、硬件与其他电子部件的印制电路板，进而形成一个完整的操作单元。

Printed Circuit Board：印制电路板

一种其上刻蚀或印制了电子电路的绝缘材料。

Printed Circuit：印制电路

由印制或蚀刻在绝缘板上的导电条等制成的电路，它可以完成元器件、接线端、组件等的互连。

Printed Component：印制元器件

形成印制电路板上部分导电图形的部件，例如电感器、电阻器、电容器、传输线等。

Printed Contact：印制接点

由印制线制成的作为接触系统一部分的导电图形。

Printed Wiring Assembly Drawing：印制电路组装图

描述印制电路板（刚性板或柔性板）及安装于其上的分立元器件的一种图纸，同时也提供为完成特定功能将上述元器件连接在一起的必要的其他任何信息。

Printed Wiring Board：印制线路板

见印制电路板（Printed Board）。

Printed Wiring Layout：印制线路布设图

描述印制线路基片的一种草图，如物理尺寸、电子和机械器件的位置、元器件电气互连导线的路由，以便为底片和文件制作提供充足的细节。

Printed Wiring：印制线路

粘接在基材表面或其上的导电图形，为分立元器件（不包括印制元器件）提供点到点的连接。

Probing Systems：探测系统

在印制电路裸板、元器件、部件和连续性试验装置之间提供电气触点的设备，其范围包括从小体积的手工单元到计算机控制系统。

Process Indicator：加工指示器

一种不同于瑕疵的可检测的异常，它放映了加工过程中材料、设备、方法、以及工艺的变更。

Production Master：生产底片、印制电路模板

用来生产一块或更多印制电路板（刚性板或柔性板）的 1∶1 比例的图形，

各项元素的精确规定必须标注于主图上。

PTH：镀通孔

“Plated Through-Holes” 的缩写，在孔的内壁上进行电镀。

Pull Strength：抗拉强度、粘接强度

见粘接强度（Bond Strength）。

PWB：印制线路板

“Printed Wiring Board” 的缩写，与印制电路板同义。

Radial Lead：放射性引脚、径向引线

指元器件的引脚是从本体侧面散射而出，而不是从末端。

Reference Edge：基准边、参考边缘

作为测量用的电缆边缘或导线边缘。

Re-flow Soldering：回流焊接、重熔焊接、再流焊

通过将元器件（引脚）放置在焊垫的焊锡膏上使元器件与基片连接，然后熔化焊锡膏达到重熔与互连。

Re-flow Spike：回流峰值

回流焊接过程中的一个阶段，该阶段焊锡的温度升高到一个足以使焊锡熔化的温度。

Re-flowing：重熔

凝固后的电沉积物的熔化。

Register Mark：对准标记

为保持重合而当作基准点使用的一种符号。

Registration：对准度、重合度

印制电路板上或多基板每层上某一面上的焊垫与其反面匹配焊垫的对准程度。

Relative Humidity：相对湿度

空气中水蒸气的含量与在给定温度下空气中水蒸气的饱和值之间的比率。

Reliability：可靠度、可靠性

在特定的环境和操作条件的影响下，元器件、部件或组装板能够正常工作一定时间的概率。

Repair：修理

恢复有缺陷的元器件或电路的工作能力的过程。

Repeatability：可重复性

系统恢复到某一特定参数状态下的能力，是评估设备过程一致性的指标。

Residue：残留、残渣

任何与加工处理有关的可见的或可测量的污染物。

Resin Smear：胶渣、胶糊渣

从基材转移到导电图形表面或边缘的树脂，通常是由于钻孔引起的，有时也称为环氧胶渣。

Resin：树脂

没有特定熔点的有机材料，是一种高分子量的聚合物。

Resist：阻剂、阻膜、抗蚀剂

用来遮盖或保护版面图形选定区域的覆膜材料，以免受蚀刻、焊接、电镀的影响。另见干膜阻剂、电镀阻剂、阻焊剂。

Reverse Image：负片影像、负图像

印制电路板上的负片干膜阻剂图像可使暴露于其外的导电区域进行后续的电镀操作。

Re-work：返工、重做

为使不工作或不相容的元器件及电路进入正常工作状态而重复进行的制造步骤或过程。

Re-working：修改、再加工

为了提高可接受的部件的成品率而重复进行的一个或多个制造过程的行为。

Rheology：流变学

流体科学，指研究流体及物质的变形，特别是关于胶状系统。

Ribbon Cable：圆线缆带

由多股圆形导线排列而成的扁平电缆。

Right-angle Edge Connector：直角板边连接器

在印制电路板的边缘终结导体的一种连接器，且使被终结的导体与电路板导体的平面呈一个直角。

Roadmap：线路与零件布局图

指采用非导体性的涂料，印制成为板面的线路与零件的布局图，以方便进行服务与修理的工作。

Rosin Flux：焊剂

一种温和的助焊剂，通常需要添加有机催化媒介。

Rosin：松香

一种从松树及其后续精炼产品中提取的硬的天然树脂（目前也有合成的），由松香酸及其异构体、一些脂肪酸和萜烯烃组成。

Saponifier：皂化剂

一种以有机或无机添加剂为主要成分的水溶液，用来促进助焊剂的清除。

SBU：顺序增层法、逐次增层法

“Sequential Build-Up”的缩写。

Schematic Diagram：原理图

借助图解符号示出特定电路安排的电气连接、元器件及其所完成功能的图。

Screen Printing：刮刀式印制、网版印制、丝网印制

用橡皮刮板将适量的阻剂挤过筛网在基板的表面上形成图像的过程，也称为丝网印制[⊖]。

Screen：网布材料

一种金属网状物或严格固定在框架结构中的标准织物，印制电路板的导电图形通过光学成像的方法加在其上。

Semi-additive Process：半加成制作过程

通过金属的化学沉积与蚀刻或电镀相结合来生成导电图形的过程，半加成制作过程用来完成与覆铜板的连接。

Semi-aqueous Cleaning：不完全水清洗

涉及溶剂清洗、热水冲刷和烘干的一种技术。

Sensitizing：敏化

见活化（Activating）。

Shadowing：回蚀死角、阴影、凹蚀阴影

蚀刻过程中发生的一种情况，指尽管在其他的地方蚀刻已完成，但在介质材料与铜箔紧密结合的部位出现蚀刻不完全的现象。在回流焊接中，元器件体阻隔红外线能量导致其不能到达板子的某些区域（造成热量不足，熔焊不完整）。在波峰焊接中，由于其他元器件阻挡焊锡的流动，造成焊锡不能浸润某些部件的引脚导致焊接的失败。

Shielding，Electronic：电屏蔽

为减轻电磁场对元器件、电路或部分电路发生交互影响而设计的导电的物理屏障。

Short：短路

不同网络的电路或导线两点间非正常的相对低阻抗的连接，短路指不应该接触的两点接触或两点间的距离小于设计规则规定的应留有的最小间距。

Signal Conductor：信号导线

用来传输外加信号的单个导线。

Signal Plane：信号层

⊖ 是在已有负性图案的网布上，用刮刀刮挤出适量的油墨（即阻剂），透过局部网布形成正性图案，印着在基板的平坦铜面上，构成一种遮盖性的阻剂，为后续选择性的刻蚀或电镀处理预做准备。这种转移的方式通称为“网版印制”，业界则常称为“丝网印制”。所用的网布材料有：聚酯类、不锈钢及已被淘汰的丝织品类等。——译者注

用来传送信号而不是起接地或其他恒定电压作用的导电层。

Signal：信号

预先规定了电压、电流、极性和脉冲宽度的电脉冲。

Silkscreen：丝印、网版印制、丝网印制

常用于图例的印制，表示印制电路板上的印制参考标志符。

Simulation：模拟

建立计算机模型、对电子元器件、电路板或系统的虚拟表示，并将虚拟的测试信号加到该模型上以验证其功能和可能的时序的过程。

Single-sided Board：单面板

只在一面有导电图形的印制电路板。

Single-image Production Master：单影像生产底片

用来制造单独一块印制电路板的生产底片。

Slump：坍落、塌散

在模板丝印后至回流焊接完成以前锡膏的扩散，严重时可导致边缘逼真度的丧失。

SMD：表面黏装组件、表面贴装器件

"Surface Mounted Device" 的缩写，被设计用来安装在印制电路板上而不必穿透板子的元器件。

Smear：胶渣

多基板在进行钻孔制作过程时，板子内部铜层的边缘在通孔内会覆上一层胶渣，这将会阻止该层与通孔铜壁的电气连接。

SMOBC：裸铜覆阻焊工艺、喷锡板

"Solder Mask Over Bare Copper" 的缩写。

SMT：表面黏装技术、表面贴装技术

"Surface Mount Technology" 的缩写，在印制电路板的加工及元器件的装配过程中，不采用带有引脚的元器件来穿过板子的一种装配技术。

Snap-off Distance：架空高度

当刮刀不工作时基片上表面与版膜下侧的距离。

Snap-off：弹回高度

版膜由于刮刀在版面上移过产生变形后再恢复到正常水平时其网布距离板面的高度。

Soak：保温时间

从预热后到内部各部分温度变得均衡这一段回流峰值温度之间的时期。

Solder（Soft）：焊锡（软焊锡）

一种熔点在450℃以下的金属合金。

Solder Bridging：锡桥

在导线间不希望形成的焊锡导体通路。

Solder Connection Pinhole：焊（接）点针孔

从焊接点表面穿透到焊接点内部不确定大小的一个小孔。

Solder Fillet：填锡

焊接点金属表面的连接处一种更好的焊锡拱形面㊀。

Solder Leveling：喷锡

将印制电路板浸于热的熔锡池之中的过程，常指热风整平㊁。

Solder Marks：焊锡污迹

网版印制的一种缺陷，其特征是线路有锯齿状的边缘，是由于不正确的拖动压力造成的。

Solder Mask，Solder Resist：阻焊剂、防焊膜、绿漆

电路图形上不设计浸焊锡的地方涂一层阻焊剂或绝缘区域。

Solder Oil（Blanket）：助焊液（敷层）

在波峰焊中使用的一种液态助焊剂，在波峰焊机槽中静态熔锡液面上形成覆膜，用于在焊接过程中消除浮渣、减小表面张力。

Solder Paste：锡膏、焊膏

细微的焊锡颗粒，其中加入了用于提高焊料浸润与控制胶粘性、干燥速率等的添加剂。

Solder Plug：锡塞、锡柱、焊料堵塞

镀通孔中的锡芯。

Solder Projection：锡尖、锡纤焊突点

固化后的焊接点或板面上所处理的焊锡皮膜层外缘所产生的不希望出现的突出物。

Solder Resist：阻焊剂、防焊膜、绿漆

不被熔融焊锡浸润的油墨、漆、光阻或金属覆膜，通常应用于印制电路板上成批焊接中阻止焊锡覆膜的特殊区域。

Solder Resist：阻焊剂、防焊膜、绿漆

见阻剂（Resist）。

Solder Side：焊接面、焊锡面

㊀ 在焊接点的死角处，于焊接过程中会有熔锡流进且填满，使接点更为牢固，多出的焊锡称为“填锡”。——译者注

㊁ 即将印有绿漆的裸铜板浸于熔锡池之中，令其在清洁铜面上粘满焊锡，拉出时再以高温的热空气把孔中及板面上多余的锡用强力予以吹走，只留下一薄层锡面作为焊接的基地，此种制作过程称为“喷锡”，我国业界用语为“热风整平”。——译者注

印制电路板与元器件面相对的一面。

Solderability Testing：焊锡性能测试

对金属被焊锡浸润能力的一种评估。

Solderability：焊接性

金属表面被熔融焊料浸润的能力。

Soldering Iron Tip：烙铁头、焊枪头

用来加热并熔化焊锡的烙铁的一部分。

Soldering：焊接

在不熔化被焊接金属基材的情况下，将金属表面与焊锡连接起来的过程。

Solderless Wrap：无焊绕接

将固态金属丝连接到方形、矩形或 V 形接线端的一种方法，用特殊的工具将金属线紧紧地缠绕在接线端上。

Solidus：固相线、固态线

能够使填充金属（焊锡）保持为全固态的最高温度。

Spurious Signal：寄生信号

见串信（Cross-talk）。

Stamped Printed Wiring：模压印制线

由冲模冲压而成的布线，它被牢牢地粘接在绝缘基材上。

Statistical Process Control（SPC）：统计过程控制

用统计技术分析过程输出，以其结果来指导行动，调整和（或）保持品质控制状态。

Step Soldering：阶段式焊接、逐次重复焊接

用连续的低温熔化焊锡合金，进行连续焊接的过程。

Step-and-repeat：逐次重复曝光

通过将同一图案连续的曝光，用来制造多图案生产底片的方法[1]。

Straight-through Lead：直通引脚

穿过孔洞的元器件的引脚，其接线端不需要后续成形。

Strain：变形

由外力导致的形状改变[2]。

Stripline：带状线、条线

---

[1] 面积很小的电路板为了生产方便起见，在底片制作阶段常将同一图案重复排列成较大的底片。制作时使用一种特殊的逐次重复曝光机，将同一小型图案逐次局部曝光再并连成为一个大底片，再用以进行大量生产。——译者注

[2] 这种已“变形”的物体将存在一股欲回到原来自然状态的反抗力量，通称之为“应力”。——译者注

一种传输线的配置，包括单独的一条细导线，与其平行等距的两个平行的大地层。

Substrate：底材、底板

见基材（Base Material）。

Subtractive Process：负过程

通过选择去除覆铜板基材上不需要的导电金属箔区域而获得导电图形的过程。

Supported Hole：支撑孔

印制电路板上的通孔，其内壁表面上镀铜或施加另外的加固材料。

Surface Insulation Resistance (SIR) Test：绝缘阻抗测试

绝缘材料（例如玻璃纤维胶片）板子上导电器件（印制线、接触点）阻抗级别的测试。

Surface Insulation Resistance (SIR)：绝缘阻抗，表面绝缘电阻

以欧姆为单位对绝缘材料（例如玻璃纤维胶片）导体间电阻进行的一种衡量。

Surface Leakage：表面（电流）泄漏

通过绝缘体边界面的电流，以区别于通过其整体体积的电流。

Surface Mounting：表面粘着、表面黏装、表面贴装

不采用元器件引脚孔进行的元器件与导电图形表面的电气连接。

Surface Tension：表面张力

液体表面所具有的一种天然的分子级内向吸引力，此种表面张力在液体与固体的交界面处抑制液体的扩散。

Surfactant：表面润湿剂

清洗液中的一种化学添加剂，用来降低表面张力以提高润湿能力。

Swaged Lead：压扁式引脚

元器件的引脚穿过印制电路板上的通孔，其穿过的部分被压扁，以便在制造操作中元器件可靠的焊接在板子上。

Tape-and-reel：带和盘

收藏贴片元器件的一种包装方法，在连续的条带上，把元器件装入凹坑内，凹坑由塑料带盖住，以便卷到盘上，供元器件方便地携带和供贴片机用。

Taped Components：卷带式连载元器件

附着在连续纸带上的元器件，以方便进行自动化装配。

Teflon：特富龙，聚四氟乙烯、PTFE 树脂

杜邦公司发明的 PTFE（聚四氟乙烯）的商品名。

Temperature Profile：温度曲线

在回流焊接制作过程中，对选定点温度随时间变化曲线的描绘。

Tented Via：覆盖式通孔

阻焊剂完全覆盖了焊垫及镀通孔的导孔，这种与外界物体完全绝缘的导孔避免了意外发生的短路，但也致使导孔不能用作测试点。

Tenting：掩蔽法

用抗蚀剂，通常是干膜，盖住镀通孔及其周围的导电图形来制造印制电路板的一种工艺方法。

Terminal Area：连接盘、焊盘、端接区

导电图形的一部分，通常但不是绝对的用来连接或粘接元器件。

Termination：端子、端接、接线端

元器件上与基板焊垫连接的部分。

Terpenes：萜烯、松节油

用来清洗电子装配部件的一种溶剂。

Test Board：测试板

用相同工艺生产的用来确定一批印制电路板可接受性的一种印制电路板。它能代表该批印制电路板的质量。

Test Coupon：板边测试、附边测试板、板边试样

印制电路板一个完整部分的样品，其上可以进行非破坏性的电气测试来评估过程控制，也可以是一部分专门用来进行总体功能测试的电路[1]。

Test Fixture：测试夹具、测试定位装置

通过互连使接受检测的特有的装配适应检测系统的一种工具。

Test Pattern：测试图形

以检测或测试为目的的板面图形。

Test Point：测试点

以测试为目的，接触电子电路的特殊的点。

Thermocouple：热电偶

由两种不同金属制成的传感器，受热时，产生一个用来测量温度的直流电压[2]。

---

[1] 电路板欲了解其细部品质，尤其是多基板的通孔结构，不能只靠外观检查及电性测试而定，还需要对其结构做进一步的微切片显微检查。因此需在板边的一处或多处设置额外的“通孔及线路”图样，作为监视该片板子结构完整性的解剖切片配合试样。对于高品质要求的电路板，凡当切样不合格时，该片板子也将不能出货。这种板边切片，不但可当成出货的品检项目，也可作为问题的对策研究及品质改进的监视工具。——译者注

[2] 是一种利用“热电”原理测温的装置。即将两种不同的金属导体以两接点予以结合，当升温时将引起金属两端电压的差异，且此差异会与升温的高低成比例，因而只要以电压计测其两端电压的变化，即可表达出该环境的实际温度。——译者注

Thermoplastic：热塑性

将熔化的聚合体放入凉的模具中形成塑胶体的最终形状，该硬化的塑胶体可多次被熔化[㊀]。

Thermoset：热固性

塑胶体加热变为永久的形状并固化或硬化，该热固性材料将不能被重新软化[㊁]。

Through Connection：通孔连接、贯穿连接

绝缘基材相对两面上导电图形间的电气连接，例如镀通孔或通孔跳线。

Tinning：热沾焊锡

为提高金属基材的焊接性而对其使用熔融的焊锡以作预备处理。

Tolling Hole：导引孔

也称为制造孔、引导孔或制作孔，它们作为印制电路板的参考点，是板上其他要素的基准。

Tombstoning：元器件立起

一种焊接缺陷，片状元器件在焊接凝固过程中被拉到垂直位置，以至于只有一只引脚与板面连接，它通常由于有缺陷的回流过程引起。

Trace：线路

导电图形中一条单独的导体路径。

Traces：导线

印制电路板上的金属导电条，它为元器件、接线端等提供连接。

Transmission Cable：传输电缆

两条或更多的传输线。

Transmission Line：传输线

由导线及绝缘介质材料所共同组成用以载送信号的线路，对其电性能加以管制，使其可以输送高频或窄脉冲信号。

Triazine：三嗪树脂

具有比环氧树脂更高的玻璃态转换温度和热稳定性的一种绝缘介质材料，但其价格较贵，使用不是很普遍[㊂]。

㊀ 高分子塑胶类受到高温的影响会软化而具有可塑性，冷却后又会变硬。这种可随温度做反复软硬变化，而本质上却很少改变的性能，称为“热塑性”。——译者注

㊁ 某些高分子聚合物一旦在高温中吸收能量而硬化后，即固定成型不再随温度升高而软化可塑，称为“热固性”。——译者注

㊂ 玻璃态转换温度是板材树脂中的重要性质，指由树脂常温坚硬的玻璃态在升温中转换成柔软橡皮态的关键温度。玻璃态转换温度愈高表示板材愈耐温而不易变形，其尺度安定性也将愈好。——译者注

Trim Lines：裁切线

定义印制电路板边界的线。

Twist：板扭、板翘、扭曲

矩形薄板、制程板或印制电路板发生的变形，该变形发生在板面上沿着与对角线平行的方向，导致板子的一角与另外的三个角不能处于同一平面上。

UL：保险商实验所、保险业试验所

保险业试验所有限公司是美国的一家公司，为设备和元器件类型建立安全标准[一]。

Ultrasonic Soldering：超声波焊接、超声连接

焊接时在熔融的焊锡中施加超声波振动频率的一种无助焊剂焊接[二]。

Undercut：侧蚀

由于蚀刻而在导体边缘引起的凹槽或凹陷[三]。

Underwriters' Symbol："保险业试验所"标志

授权贴在产品上的一种徽标，证明该产品已经被保险业试验所所认可。

Unsupported Hole：非镀通孔、非支撑孔

通孔内既不含有导体材料也不含有任何类型的加固物。

Vacuum Pick-up：真空拾取

一种带有一个真空吸杯的元器件处理工具，以利于脱焊过程中焊锡的拾取和移除。

Vapour Phase：气相（焊接）

焊接回流过程中使用蒸气化的溶剂作为热源，将焊锡加热到超过其熔点来完成元器件到电路板的焊接点。

Via Hole：导通孔

一种镀通孔，其惟一的目的是为电路板的一面或一层上的导体与另一面或另一层上的导体提供连接。导通孔不作为元器件引脚的插入孔，也不用于加入

[一] U. L. 是 Underwriter's Laboratories，INC. 的缩写，这是美国保险业者所共同出资组成的大型实验及试验机构。成立于1894年，现在美国各地设有五处试验中心，专对美国市场所销售的各种商品在其"耐燃"及"安全"两方面把关。——译者注

[二] 当熔融焊锡与被焊对象接触时，再另施加超声波的能量，使此能量进入融锡的波中，在固体与液体的接口处产生半真空泡，对被焊的固体表面产生摩擦式的清洁作用，而将表面污物与钝化层除去，并对融锡赋予额外动能，以利于其渗入死角。如此可使液态融锡与清洁的金属面直接焊牢，减轻对助焊剂预先处理的依赖。此方法对不能使用助焊剂的焊接场合非常有效。——译者注

[三] 在印制电路板中用于蚀刻过程，当板面导体在阻剂掩膜的保护下进行喷蚀时，理论上蚀刻液会垂直向下或向上进行蚀刻，但因药水的作用并无方向性，故也会产生侧蚀，造成蚀后导体线路在截面上显现出两侧的内陷，称为侧蚀。——译者注

紧固材料。

Via：导孔、盲孔、埋孔

用作电路板层间连接的镀通孔，但不作为元器件引脚的端接点。它可能是不完全穿透的盲孔或从外层看不见的埋孔。

Virtual Prototype：虚拟样机

电子产品的计算机模型虚拟表示，可以用来考查不同的设计方案以便在建造物理设备之前证实产品是否达到设计要求。

Viscosity：黏度（黏滞度）

流体的一种性质，使其获得并保持一定程度的抗剪应力，该应力是依赖于流体的流动速度，进而出现的一种连续反抗流动的阻力。黏滞度的绝对单位用泊来衡量，更常用的是百分之一泊。

Void：空洞

电路板的某一部位缺少基材形成的孔洞[㊀]。

Voltage Plane：电压层

印制电路板上的一种导体区或多基板中以与接地层不同的一层为导体层，通常除供给零件所需的电压外，也兼有散热与屏障的功能。

Wave Exposure：织纹显露、露布纹

出现在基材板表面的一种现象，指未破损的玻璃布没有被树脂完全覆盖住。

Wave Soldering：波峰焊

一种将元器件与印制电路板焊接到一起的技术，通过将装配物与熔融的锡波接触而使预涂熔剂的地方焊在一起。

Weave Exposure：织纹显露

基材表面失去其外表所覆盖的树脂层，露出底材的玻璃布的情况称为织纹显露。

Wetting：沾锡、浸润、焊料润湿

焊锡涂覆在基底孔金属上形成相对均匀、光滑、连续粘接的焊料薄膜。

Whisker：晶须

在进行板面线路镀铜时，各导体线路的边缘有针状的金属突出物出现称为晶须。

Wicking：灯芯效应、芯吸

电路板的板材经钻孔后，其玻璃纱束切断处常呈疏松状态，对各种槽液发

㊀ 此词常用于电路板的通孔铜壁上，是指已见底的穿孔或局部铜厚低于允收下限的区域。——译者注

生抽吸的毛细现象称为灯芯效应。

Yield：良品率

制造过程结束后，提交检验的可用产品与总提交产品的比率。

Z-Stroke：Z型冲程

为了部件定位和插入，元器件安放机械的头部在部件正上方位置的运动。

附录 C　部分英制单位与国际单位间的换算

物理量名称	非法定计量单位		法定计量单位		单位换算
	名称	符号	名称	符号	
长度	英尺	ft	米	m	1ft = 0. 304 8m
	英寸	in			1in = 0. 025 4m
	密耳	mil			1mil = 10^{-3}in = 25. 4 × 10^{-6}m
面积	平方英尺	ft^2	平方米	m^2	1ft^2 = 0. 092 903 0m^2
	平方英寸	in^2			1in^2 = 6. 451 6 × $10^{-4}$$m^2$
体积	(美)加仑	USgal	立方米	m^3	1USgal = 3. 785 41dm^3
	注射器计量单位	cc			1cc = 1cm^3
质量	磅	lb	千克	kg	1lb = 0. 453 592 37kg
	盎司	oz			1oz = 28. 349 5g
	格令	gr			1gr = 0. 064 798 91g
	[米制]克拉				1 米制克拉 = 2 × 10^{-4}kg
力	盎司力	ozf	牛[顿]	N	1ozf = 0. 278 014N
压力	标准大气压	atm	帕[斯卡]	Pa	1atm = 101. 325kPa
	磅力每平方英寸	lbf/in^2			1lbf/in^2 = 1psi = 6 894. 76Pa
	巴	bar			1bar = 10^5Pa
导热系数	卡每厘米秒开[尔文]	cal/(cm · s · K)	瓦[特]每米开[尔文]	W/(m · K)	1cal/(cm · s · K) = 418. 68W/(m · K)

参考文献

Alan Roads, R. (1991) Automation SMD Assembly. *Electronic Production*, March 1991, p. 17.

Anderson, M. J. (1998) Improve PCB Gold-plating Yields Using DOE. *Electronics Engineer*, November 1998, contact: info@ statease. com.

Andrus J. J. (1990) Successful PCB Water Cleaning Systems, *Electronic Packaging and Production*, October 1990, p. 64.

Banks, S. (1995) Reflow Soldering to Gold. *Electronic Packaging and Production*, June 1995, p. 69.

Barclay, B and Morrell, M. (2001) Laser Direct Imaging: A User's Perspective, Internet notes www. circuitree. coml.

Barsky, LA, Schubov L, Bondar I (1991) Recovery of Non-ferrous Metals from Industrial and Urban Wastes Using Electrodynamic Separators. In: Reprints of *XVII Intl Mineral Processing Congress*, Vol. VII, Dresden, Germany, Bergakademie Freiberg, PP 45-51.

Bauer B. (1994a) Guide to No-Clean Solder Pastes. *Electronic Packaging and Production*, March 1994, p. 65.

Bauer B. (1994b) Guide to No-Clean Solder Pastes, *Electronic Packaging and Production*, August 1994, p. 12.

Baumgartner, D (1996) Quick-Turn Design and DFM, *Printed Circuit Fabrication Asia*, May/June 1996, p. 14.

Bhardwaj, A. (2001) Design and Test Tools for Controlled Impedance on High Speed Boards, *National Conference on Emerging Trends in Electronics Design and Technology*, CEDTI, Mohali,

Biancini A. J. , Supernova (1991) Advanced Surface Mount Design for Manufacturability, *Electronic Packaging and Production*, March 1991, p. 40.

Boothroyd G. (1990) Designing for Assembly, *Electronic Production*, February 1990, p. 32.

Bosshart, W. C (1983) Printed Circuit Boards, *Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd.*, New Delhi.

Boyd, J. (1998) The Pulse-heated Solution. *SMT*, February 1998, p. 114.

Braun, M. S. W. (2003) PCB Handbook for Assembling and ESD Control, *CEDTI*, January 2003, p. 25.

Braun, M. S. W. , (2002), PCB Design Hand Book, *CEDTI*, Mohali.

Breitengross R. A. (1993) A Case Study from the Navy on the Fabrication of Printed Wiring Boards, Internet Notes, http//es. epa. gov/techinfo/case/navy-cs1.

Brist, G. , Stewart, J. and Bird, S. (1997) Plasma-Etched Microvias, *Printed Circuit Fabrication Asia*, Vol. 5, No. 2 March/April 1997, p. 19.

Brock P. (1992) Protecting Populated PCBs against ESD Damage in the OEM's Plant, *Electronic Production*, August 1992, p. 15.

Brooks D(2002) Basic Transmission Lines, Why Use Them At All?, *Ultracad Design, Inc. and Mentor Graphics Corporation*, Internet Notes.

Brooks D. (1997a) Cross-talk, Part 1: The Conversation We Wish Would Stop!, *UltraCAD Design, Inc.*

Brooks D. (1997b) Cross-talk, Part 2: How Loud Is Your Cross-talk?, *UltraCAD Design, Inc.*

Broomfield N. (1992) Selecting Water Treatment Plant for Aqueous Cleaners, *Electronic Production*, March 1992, p. 31.

Bruhn, B. (1997) Environmental Excellence, *Printed Circuit Fabrication Asia* January/February 1997, p. 10.

Buckley, D. (1990a) Surface Mount Soldering, *Electronic Production*, September 1990, p. 43.

Buckley, D. (1990b) Cleaning, Inspection, Re-work and Testing, *Electronic Production*, October 1990, p. 33.

Buckley D. (1990c) Components and Substrates, *Electronic Production*, July 1990, p. 29.

Buckley, D. (1992) Mechanical Drilling Eliminated in New PCB Technology, *Electronic Production*, September 1992, p. 11.

Cannon, M. (2001) The Micro Wave Revolution, *Technical Article*, *ERSA* GmbH, www. Solder Well _e. indd.

Cavallaro, K. and Marchitto, M. (1991) Solder Paste Dispensing Versus Screen Printing, *Circuit Assembly*, October 1991, p. 40.

Cavallaro, K. J. (1994) Dispensing Adhesives for High-throughput SMT Assembly, *Electronic Packaging and Production*, August 1994, p. 16.

Chilton, C. and Gaugler, K. (1990) Solder Creams for Fine Pitch Assemblies, *Electronic Production*, May 1990, p. 19.

Coombs, C. F. (1988) Printed Circuit Handbook. *McGraw-Hill Book Company.*

Corrigan, K. (1992) Flex Circuit Properties Impact Packaging Design, *Electronic Packaging and Production*, May 1992, p. 86.

Creighton, M. (1996) Express Delivery on the Information Highway, *Printed Circuit Fabrication Asia*, May/June 1996, p. 22.

Cronin, R. (1995) Bare Board Test Program Generation, *Electronic Packaging and Production*, January 1995, p. 54.

Crum, S. (1993) Chipshooters Provide High Speed Placement, *Electronic Packaging and Production*, April 1993, p. 32.

Crum, S. (1994a) Flexible Laminate Materials Affect Circuit Performance, *Electronic Packaging and Production*, November 1994, p. 34.

Crum, S. (1994b) Bare Board Test Services Keep Pace with Test Technology, *Electronic Packaging and Production*, June 1994, p. 52.

Crum, S. (1995) Rapid Prototyping of Printed Circuit Boards, *Electronic Packaging and Production*, Feb. 1995, p. 58.

Daniels, R. (1991) Solder: Past, Present, Future. *Circuits Assembly* April-1991, p. 7.

Dolberg, S. and Kovarsky, M. (1997) Replacing Gerber Format, *Printed Circuit Fabrication Asia*, May/June 1997, p. 12.

Doyle K. (1991) AOI—The Way Forward, *Electronic Production*, April 1991, p. 17.

Duck, A. (1996) Dispensing SMT Adhesives, *Electronic Production*, May 1996, p. 21.

Dytrych, N. M. (1993a) Reviewing the Basics of Mass Re-Flow Soldering, *Electronic Packaging and Production*, July 1993, p. 34.

Dytrych, N. M. (1993b) Ensuring Bare Board Quality with Electrical Test, *Electronic Packaging and Production*, February 1993, p. 38.

Ehrler, S. (2002) A Review of Epoxy Materials and Reinforcements, Part 1, *PC Fab*, April 2002, p. 32.

Engelmaier, W. (1991) Component Reliability, *Circuits Assembly*, March 1991, p. 44.

Erdmann, G. (1991) Improved Solder Paste Stencilling Technique, *Circuits Assembly*, February 1991, p. 66.

Evans, D. (1991) Tackling the Test Problem, *Electronic Production Supplement*, October 1991, p. 35.

Falco, M. (1991) Inexpensive Microsectioning, *Circuits Assembly*, June 1991, p. 46.

Feldmann, K. and Scheller H. (1994) Disassembly of Electronic Products. In: Proc 1994 *IEEE Intl Symposium on Electronics and Environment*, IEEE, Piscataway NJ USA, pp. 81-86.

Ferrari, G. (1997) The Evolution of New Design Standards, *Circuits Assembly Asia*, May/ June 1997, p. 32.

Filleul, M. (1990) Clean Re-flow Soldering, *Electronic Production*, May 1990, p. 10.

Finstad, M. (2001) Designing for Flexibility and Reliability, *Minco Application Aid* 31, www. minco. com.

Fishburn, J. (2002) Seeing the Light of Full Colour Inspection. Internet notes, oeiwcsnts1. omron. com.

Fjelstad, J. (2001) Flexible Thinking. Internet Note, www. circuitree. com.

Fleck, I. (1994) Laser-cut Stencils Control Print Volumes for No-clean Solder Cream Printing, *Electronic Packaging and Production*, August 1991, p. 8.

Fulker, P. (1992) Aqueous and Semi-aqueous Cleaning: Discharges and Costs, *Electronic Production*, February 1992, p. 17.

Gaudion M (2000) Controlled Impedance Test, *The Board Authority*, September 2000, p. 56.

GE Electromaterials (2001) *The manufacture of Laminates*, www. geplastics. com/ electromaterials.

Gemmell, A. (2003) Printed Circuit Board Manufacturing Pollution Prevention *Opportunities Checklist*, Internet Notes; http://es. epa. gov/techinfo/facts/cheklst7. html.

George, G. (1999) Typical Component Lead Sizes, Internet Notes, contact: glen@ caltech. edu.

Ginsberg, L. G. (1992a) Printed Circuit CAD Systems and Software: Part 3 *Electronic Packaging and Production*, April 1992, p. 52.

Ginsberg, L. G. (1992b). Printed Circuit CAD Systems and Software: Part 1 *Electronic Packaging*

and Production, January 1992, p. 40.

Ginsberg, L. G. (1992c) CAD in Concurrent Engineering: Part 4, *Electronic Packaging and Production*, May 1992, p. 60.

Goosey M. and Kellner R. (2002) End-of-life Printed Circuit Boards: A Scoping Study supported by Department of Trade and Industry. August 2002.

Goosey, M (2003) New Printed Circuit Board Laminate Material, www. intellectuk. org, April 2003.

Gothard A. (1991) Inert Atmosphere, *Electronic Production*, May 1991, p. 11.

Grant J. (1990) Low Cost Static Protection, *Electronic Production*, February 1990, p. 37.

Guiles, C. L (1998) Everything You Ever Wanted to Know About Laminates... But Were Afraid To Ask, 7th Edition, Arion Inc. (Rancho Cucamonga, CA), 1998.

Gurain, M,, Ivory N. (1995), Performance Requirements of Primary Liquid Resists, *Electronic Packaging and Production*, March 1995, p. 49.

Hall, S. (1994) Screen Printer Requirements for Low Defect Process Capability, *Electronic Packaging and Production*, June 1994, p. 4.

Hallee, P. J. (1996) Testing High-Tech PCBs, *Printed Circuit Fabrication Asia*, Vol. 4, No. 4 July/August 1996, p. 18.

Hamilton, S. (1996) The Contamination Audit—A Vital Tool For Yield Improvement, Circuit World, Vol. 22, No. 3, p. 24.

Harnsberger S and Saloka, T. (1994) Integrated Solutions for Metal Recovery and Water Recycling, *Electronic Packaging and Production*, September 1994, p. 42.

Harris, N. (1991) SM Adhesives-Just Strong Enough, *Electronic Production*, October 1991, p. 13.

Haskard, M. R (1998) Electronic Circuit Cards and Surface Mount Technology, *Technical Reference Publications Ltd.*

Herrmann, G., and Egerer, K. (1992), Handbook of Printed Circuit Technology, *Electrochemical Publications Limited.*

Hinton E. P. (1992) Solving the Problems of Internal Layer Registration, *Electronic Packaging and Production*, January 1992, p. 28.

Hodson, L. T. (1991) The Plating Process Optimizes PCB Performance, *Electronic Packaging and Production*, September 1991, p. 52.

Hodson L. T. (1993a) Selecting Pick and Place Equipment, *Electronic Packaging and Production*, June 1993, p. 32.

Hodson L. T. (1993b) Reworking the Surface Mount Assembly, *Electronic Packaging and Production*, October 1993, p. 46.

Hodson L. T. (1992) Solving Rework and Repair Problems, *Electronic Packaging and Production*, January 1992, p. 22.

Holden, H. (2003a) HDI's Beneficial Influence of High-Frequency Signal Integrity. Internet Notes, Mentor Graphics Technical paper at www. mentor. com/pcb/tech_papers.

Holden, H. (1997) PWB Build-up Technologies: Smaller, *Thinner and Lighter*, *Circuit World*, Vol.

23, No. 2, p. 14.

Holden, H., Kenyon L. (1994) Framework-Based Electronic Assembly, *Electronic Packaging and Production*, November 1994, p. 44.

Holden, H. and Charbonneau R. (2000) Predicting HDI Design Density, *The Board Authority*, Vol. 2, No. 1, April 2000, pp. 28-31.

Holden, H. (2003 b) How to get started in HDI with Microvias. Technical Paper Series by Mentor Graphics at www.mentor.com/pcb/tech_papers.

Hudson, K. (2003) IDCT Announces 275.000 RPM Multi-Head Drilling with Vision, Internet Notes www.pcbdriller.com.

Hunn, N. (1990) Getting Results from Hot Gas Rework, *Circuit Assembly*, November 1990, p. 21.

Iji. M, Yokoyama S (1997) Recycling of Printed Wiring Board Mounted Electronic Components, *Circuit World*, 23, No. 3, pp. 10-15.

Isaac, J. (1995) New Solutions for High Performance PCB Design, *Electronic Packaging and Production*, March 1995, p. 54.

Jeffery J. E (1997) Impedance Control of Conductors Acting as Transmission Lines in Printed Boards for High-frequency Digital Applications, *Circuit World*, Vol. 23, No. 2, 1997, p. 22.

Johnson, G. and Sparkman, O. (1996) The Future of Small Hole Drilling, *Printed Circuit Fabrication Asia*, May/June 1996, p. 26.

Judd, M. and Brindley, K. (1992) Soldering in Electronics Assembly, *Newnes*.

Justino, P (2002) An Overview of Hybrid Laser Drilling. Internet Notes, www.circuitree.com.

Kamat, P., Spilar L. and Yeager J. (1995) SIR System Design Ensures Test Accuracy, *Electronic Packaging and Production*, March 1995, p. 60.

Kawai, M. (2003) Motorola Ships Passive-Embedded PCB for Mobile Phones, *Nikkei Electronics Asia*, May 2003, p. 30.

Keeler, R. (1990a) Electroless Copper Technology in Transition, *Electronic Packaging and Production*, October 1990, p. 70.

Keeler, R. (1990b) Fine Pitch Soldering Options, *Electronic Packaging and Production*, October 1990, p. 41.

Keeping, S. (2000) Lasers Lead the Way for Microvias, *Electronic Production*, Issue 7, Vol. 29, p. 51.

Keimeier, S. (1994) Re-use before Recovering—Second Hand for Electronic Components, *OTTITechnologie-Kolleg*, Regensburg.

Kelley, A. and Jones, S. (2002) Application of Laser Direct Imaging. Internet Notes, contact: Kelley@circatex.com and Jones: stephenjones@tiscali.co.uk.

Lange, B. and Vollrath, K (www.lpkfusa.com) Highly Versatile Laser System for the Production of Printed Circuit Boards. Internet Notes.

Lasky, C. R., Primavera, A., Borgesen, P. and Lassen, © (1996) Critical Issues in Electronic Packaging, Part-III, *Circuits Assembly Asia*, September/ October 1996, p. 28.

Lea, T. (1990) Testing SMT Bare Boards, *Electronic Production*, January 1990, p. 29.

Legarth, J. B. and Alting L. et al (1995) A New Strategy in the Recycling of Printed Circuit Boards, *Circuit World*, Vol. 21, No. 3, p. 10.

Leonida, G. (1989) Handbook of Printed Circuit Design, Manufacture, Components and Assembly, *Electro chemical Publications Ltd.*

Lexin, J. (1993) Cleaning and Handling of Flex Circuits, *Electronic Packaging and Production*, October 1993, p. 42.

Lideen, D. J., Dahl, A. (1995) Process Techniques for Pitch Screen Printing, *Electronic Packaging and Production*, July 1995, p. 30.

Lin, J. (2003) High Tg and Low Dk Laminate for Next Generation Printed Wiring Board, *Product Bulletin of Nan Ya Plastics Corporation*, www. npc. com.

Lindsey, D. (1985), Analog Printed Circuit Design and Drafting, *Bishop Graphics, Inc.*, California, USA.

Linman, D. (1990) Pre-heat Improves VPS Process, *Electronics Production*, February 1990, p. 24.

Lucas, L. G. (1993) Laminate Developments Enhance PCB Performance, *Electronic Packaging and Production*, April 1993, p. 42.

Lum, S. and Waddell P. (1996) An EMI/EMC Primer, *Circuits Assembly Asia*, March/April 1996, p. 26.

Manko, H. H. (1994). Lead Poison, Solder and Safety in the Workplace, *Electronic Packaging and Production*, February 1994, p. 93.

Mantay, M. K, Range, L. A and Schoenberg, L. N (1991) Optimizing Auto-routing Boosts PCB Manufacturability, *Electronic Packaging and Production*, June 1991, p. 58.

Markstein, H. W. (1993) Inspecting Assembled PCBs, *Electronic Packaging and Production*, September 1993, p. 70.

Markstein, W. H. (1995) Effective Shielding Defeats EMI, *Electronic Packaging and Production*, February 1995, p. 76.

Masaoka, K., Tanaka, Y. and Kobayshi, H. (1993) A Newly Developed System for Small Annular Ring Formation, May 1993 p. 22.

Maxfield, Clive (Max) and Wiens, David (2000) System Solutions, Re-defining Systems Design for the Electronics Community, *Technical Publication*, Mentor Graphic Corporation, September 2000, www. mentor. com/pcb p. 1.

Meier, J. D and Schmidt, H. S (2002) PCB Laser Technology for Rigid and Flex HDI-Via Formation, Structuring, Routing, *IPC Printed Circuit Expo*, Long Beach, CA.

Melton, C. and Fuerhaupter, H. (1997) Lead-free Tin Surface Finish for PCB Assembly, *Circuit World*, Vol. 23, No. 2, p. 30.

Mentor Graphics (2001) Board Systems Design and Verification, www. mentor. co,. p. 1.

Mentor Graphics (2002) Design Exchange: Seizing Control of the Design Process, *Technica Publication.*

Meyer, J., Werke, Kathrein, Rosenheim, K. G. (1991) Automated Package Design for High Speed Analog PCB, *Electronic Packaging and Production*, February 1991, p. 92.

Miller, M. B. (1997) Zero Wastewater Discharge, *Printed Circuit Board Fabrication Asia*, January/February 1997, p. 16.

Minco Application Aid 24(2000), *Flex-Circuit Design Guide*, www. minco. com.

Montrose, (2003) EMC Suppression Concepts for Printed Circuit Boards. Internet Notes, www. ieee. org.

Morris, B. (1990) Reworking Fine Pitch SMCs, *Electronic Production*, Februray 1990, p. 12.

Muller, K. D (2000) Multi-layer Prototype and Series Production, *LPKF Laser and Electronics Application Report*, January 2000, p. 4.

Nakahara, H. (1991) Full Build Electroless Copper Plating is the Process of the Future, *Electronic Packaging and Production*, January 1991, p. 50.

Nargi—Toth, K. (1994) Additive Processing on the Upswing, *Electronic Packaging and Production*, December 1994 p. 38.

Nasta, M., and Peebles, H. C(1995) A Model of the Solder Flux Reaction; Reactions at the Metal/Metal Oxide/Electrolyte Solution Interface, *Circuit World* Vol. 21, No. 4, 1995, p. 10.

Neues, A (2002) Intelligent Visual Inspection Guidance, *Technical Article*, *ERSA GmbH*, www. ersa. de. info@ ersa. de.

Nimmo K. (2003) European Legislation on Lead in Electronics Circuits Moves Forward, *Solder and Assembly Technology*, No. 2, p. 2.

Noble, P., and Moore, R. (1992) Determining the Accuracy of Screen Printing Machines, *Electronic Production*, September 1992, p. 31.

Murray, G. (1996) Tearing Down the Wall, *Printed Circuit Fabrication Asia*, May/June 1996, p. 18.

Okubo, S. and Otsuki T. (2003) Mobile Phones Integrate OCR, Remote Controller Functions, *Nikkli Electronic Asia*, March 2003, p. 34.

Olney, B. (2003) EMC Design for High Speed PCB's. www. icd. com. au/ar. ticles/emc. html.

Oresjo, S(2003) Selecting the Optimal Test Strategy, *Circuits Assembly*, July 2003, p. 14.

Oresjo, S. (1990) Boundary Scan, *Circuits Assembly*, December 1990, p. 38.

Patterson, T. B. (1992) Additive and Subtractive Process Join Forces, *Electronic Packaging and Production*, March 1992, p. 40.

Peace, G. (1991) Towards Tomorrow's PCBs. Electronic Production, Oct. 1991, p. 24.

Polar Instruments(2001) Transmission Line Configurations Application Note 121.

Polar Instruments (2002) PCB Test—Locate Faulty Digital ICs Easily with In-circuit Function Test, Application Note 111, www. polarinstruments. com.

Polar Instruments (2003a) Introduction to Controlled Impedance, Application Note 120, www. polarinstruments. com.

Polar Instruments(2003b), Microstrip Transmission Line Structures, Application Note 122.

Polar Instruments(2003c) Single-ended Stripline Structures, Application Note 123.

Polhamus L. R. (1991) Cleaning Circuit Boards Populated with SMDs, *Electronic Packaging and Production*, February 1991, p. 84.

Pollack, H. W and Jacques R. C (1992) Adhesiveless Laminates Improve Flex Circuit Performance, *Electronic Packaging and Production*, May 1992, p. 74.

Price, D(1992) SMT Board Finishes-Going for Gold, *Electronic Production*, April 1992, p. 9.

Purdie, D. (1991) Repairing/Modifying Surface Mount PCBs, *Electronic Production*, February 1991, p. 11.

Qazi, J. M. and Calla, D. (1997) The Benefits of Machine Vision, *Circuits Assembly Asia*, January/February 1997, p. 26.

Betancourt, R. *et al.* (1996) Diseno y construccion de un amplificador de bajo ruido para la banda de 8-18GHz, Memorias del Congreso de Instrumentation SOMI, XI, 636.

Raby, J. (1994) Assuring Solder Joint Reliability in Repair, *Electronic Packaging and Production*, September 1994, p. 54.

Rae, A. (2003) The Costs of Going Green, *Circuits Assembly*, July 2003, p. 22.

Raman, S. (2001) Laser Microvia Productivity: Dual Head Laser Drilling Systems. Internet Notes, www. circuitree. com.

Raman, S., Davignon, J. and DiMarchoberardino, M. (www. esi. com) Implementation of Laser Technology in New Applications on PCB.

Rangel, R., Betancourt, R. and Chavez, R. (1997) Laser Drilling on Alumina-Based Printed Microwave Circuits, *Instrumentation and Development*, Vol. 3, No. 8, p. 53.

Reithinger, M. (1991), IR Vs VPS—A User's Evaluation, *Electronic Production*, March 1991, p. 27.

Robinson M. (1990) Shielding Against EMI, *Electronic Production*, March 1990, p. 43.

Ross, M. W. and Leonida, G. (1997) General Principles of Design and Layout (Printing Board Assemblies), *Circuit World*, Vol. No. 23, 1997, p. 18.

Ross, M. W. and Leonida, G. (1996a) General Principles of Design and Layout (of Printed Board Assemblies) *Circuit World*, Vol. 23, No. 1, 1996, p. 25.

Ross, M. W. and Leonida, G. (1996b) General Principles of Design and Layout (of Printed Board Assemblies) Circuit World, Vol. 22, No. 4, p. 24.

Rubin, W. (1995) The Concept and Success of No-clean Technology, *Circuit World*, Vol. 21, No. 2, p. 23.

Saito, (1994) National Institute Resources and Environment. Tsukuba, Japan (1994) Recovery of Valuable Metals from PWB Wastes (2) Hydrometallurgical Treatment of PWB Wastes. Trans Meter Res Soc Jpn (1994), 18A (Ecomaterials), 211-14, CODEN: TMRJE3 Joumai written in Engilish. CAN 123-88995 AN 1995: 700167.

Sallau, A, and Wiemers, A. (1999) Laser Directo Imaging, Publication ILFA GmbH, Edition 5.9 a. Internet Notes.

Saltzberg, M. A, Neller, A. L, Harvey, C. S, Borninski T. E and Gordon, R. J (1996) Using Polymer Thick Film for Cost-effective EMC Protection on PCBs for Automotive Applications Vol. 22, No. 3, 1996, p. 67.

Samsami, D. (1990a) Fine Pitch Soldering Defects, *Electronic Packaging and Production*,

November 1990, p. 35.

Samsami, D. (1990) Enhancing the Manual Inspection Process, *Electronic Packaging* and Production, December 1990, p. 37.

Savage, R. (1992) Manufacturing Copper Foil For Flexible Circuits, *Electronic Packaging and Production*, May 1992, p. 80.

Scaminaci, Jr., J. (1994) Avoiding Signal Integrity Problems in Back Pains, *Electronic Packaging and Production*, July 1994, p. 40.

Shaw, J. M., *et al.* (1997) Big Blue Goes Green, *Printed Circuit Board Fabrication Asia*, January/February 1997, p. 27.

Shipley, C. (1991) Fixtureless Fine Line Board Testing, *Electronic Production*, April 1991, p. 29.

Siemens, A. G. (1991) IR vs VPS—A User's Evaluation, *Electronic Production*, March-1991, p. 27.

Slezak, E. (1994) Soldering Materials Trends, *Electronic Packaging and Production*, December 1994, p. 11.

Smith, J. (1993a) Equipment for Cleaning the Surface Mount Assembly, *Electronic Packaging and Production*, August 1993, p. 40.

Smith, J. (1993b) Countdown to CFC Phase-Out, *Electronic Packaging and Production*, January 1993.

Smith, K. (1991) The Case for Hot Bar Reflow, *Electronic Production*, January 1991, p. 13.

Spiak, R. and Valiquette, K. (1994) Trends in the Laminate Industry, *Electronic Packaging and Production*, p. 5.

Spitz, S. L (1990) The Case for Metal Recovery, *Electronic Packaging and Production*, July 1990. p. 44.

Stearns, T. (1992) Dielectrics Influence Circuit Performance and Laminate Processing, *Electronic Packaging and Production*, May 1992, p. 66.

Straw, J. J. (1992) Solutions to Fine Pitch Bare Board Electrical Test Challenges, *Electronic Packaging and Production*, March 1992, p. 28.

Taylor, S. (1991a) Complex Synthetic Fluxes Offer Enhanced No-clean Performance, *Electronic Production*, October 1991, p. 27.

Taylor, S. (1991b) Controlling the Wave Soldering Process for Synthetic Fluxes, *Electronic Production*, December 1991, p. 9.

Tennant, T. (1994) Solder Mask Options for the '90s, *Electronic Packaging and Production*, *February* 1994, p. 99.

Tong, P. (2003) Using Visual Inspection in Your PCB Test Strategy. Internet notes, www.eetasia.com.

Travi, C., Albertini, M. and Gemme, C. (1996) Effects of High Electrical Stress in PCBs, *Circuit World*, Vol. 22, No. 2, p. 16.

UltraCad Design (2000) Controlling Impedance. Internet Notes, www.omnigraph.com.

Vandervelde, H. (2001) PCB Handbook, *McGraw-Hill Publishing Company*.

Vaucher, C. and Jaquet, R. (2002) Laser Direct Imaging and Structuring: An Update, Internet notes, www.circuitree.com.

Vernon, D. (2003) Machine in the Electronics and PCB Inspection Industry. Internet Notes, www-prima.inrialpes.fr.

Wallig, L. (1992) Adhesives Bond Flex Circuit Materials, *Electronic Packaging and Production*, May 1992, p. 71.

Ward, J, (1992) Options in Generating High Quality Phototools, *Electronic Packaging and Production*, July 1992, p. 62.

Waryold, J and Lawrence, J. (1991) Conformal Coating, *Circuits Assembly*, June 1991, p. 56.

Waryold, J. et al (1998) A conformal Coatings Selection Guide. *Surface Mount Technology (SMT) Magazine*, Vol. 12, No. 2, p. 84.

Watts, N. (1993) Establishing a PCB Quality Assurance and Reliability Program, *Electronic Packaging and Production*, May 1993, p. 25.

Wiens, D (2000) Printed Circuit Board Routing at the Threshold, *Mentor Graphics*, May 2000.

Wilk, F. L. (1994) Treatment/Recycle of Wastewaters from Alternative Cleaning Processes, *Electronic Packaging and Production*, June 1994, p. 46.

Williamson, I. (1990) Front-End Automation, *Electronic Production*, February 1990, p. 19.

Willis, B. (1992) Repairing Damaged Plated Through Holes, *Electronic Production*, December 1992, p. 9.

Winstanely, A. (2003) The Basic Soldering and Desoldering Guide, Internet Notes, www.epemag.wimborne.co.uk.

www.thinktinkr.com Internet notes (2003) Multi-layer PCB Prototyping.

Yokoyama, S. and Iji, M. (1995) Recycling of Printed Wiring Board Waste. Proceedings of IEEE, p. 132.

Zarrow, P. (2000) Coolest Things Since Slice Bread. Internet Notes, www.ITM-SMT.com.

Zweig, D. (1996) Concurrent Growth, Multi-layer PCBs and X-ray Inspection, *Printed Circuit Fabrication Asia*, September/October 1996, p. 22.

国际视野　科技前沿

国际信息工程先进技术译丛

《WCDWA原理与开发设计》

《下一代移动系统：3G/B3G》

《IMS:IP多媒体概念和服务》（原书第2版）

《下一代无线系统与网络》

《深入浅出UMTS无线网络建模、规划与自动优化：理论与实践》

《HSDPA/HSUPA技术与系统设计——第三代移动通信系统宽带无线接入》

《无线传感器及元器件：网络、设计与应用》

《印制电路板——设计、制造、装配与测试》



上架指导：工业技术/电子技术

Mc Graw Hill Education

编辑热线：(010)88379768

地址：北京市百万庄大街22号　邮政编码：100037
联系电话：(010) 68326294　网址：http://www.cmpbook.com（机工门户网）
(010) 68993821　E-mail: cmp@cmpbook.com

ISBN 978-7-111-23048-9

封面设计：马精明

定价：88.00元

